

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS

CARLOS ALBERTO SANCHES

***ALERTOR FERROVIÁRIO -***  
**SISTEMA AUTOMÁTICO DE AVISO DA APROXIMAÇÃO ENTRE VEÍCULOS E**  
**TRABALHADORES**

CAMPINAS

2019

CARLOS ALBERTO SANCHES

***ALERTOR FERROVIÁRIO -  
SISTEMA AUTOMÁTICO DE AVISO DA APROXIMAÇÃO ENTRE VEÍCULOS E  
TRABALHADORES***

Dissertação apresentada como exigência para obtenção do título de Mestre em Gestão de Redes de Telecomunicações ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da Faculdade de Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

Orientador: Prof. Dr. Eric Alberto de Mello Fagotto.

CAMPINAS

2019

Ficha catalográfica elaborada por Andréa Ribeiro Alves Bonfim CRB 8/6973  
Sistema de Bibliotecas e Informação - SBI - PUC-Campinas

625.1  
S211

Sanches, Carlos Alberto

Alertor ferroviário - sistema automático de aviso da aproximação entre veículos e trabalhadores / Carlos Alberto Sanches. - Campinas: PUC-Campinas, 2019.

113 f.: il.

Orientador: Eric Alberto de Mello Fagotto.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2019.

Inclui bibliografia.

1. Ferrovias. 2. Redes de sensores sem fio. 3. Sistemas de segurança. I. Fagotto, Eric Alberto de Mello. II. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD - 22. ed. 625.1

**CARLOS ALBERTO SANCHES**

---

**ALERTOR FERROVIÁRIO - SISTEMA AUTOMÁTICO DE  
AVISO DA APROXIMAÇÃO ENTRE VEÍCULOS E  
TRABALHADORES**

---

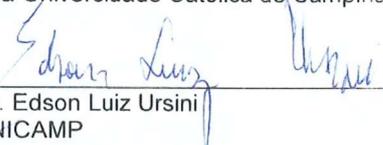
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da Pontifícia Universidade Católica de Campinas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Gestão de Redes de Telecomunicações.

Área de Concentração: Engenharia Elétrica.  
Orientador: Prof. Dr. Eric Alberto de Mello Fagotto

Dissertação defendida e aprovada em 29 de novembro de 2019 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Eric Alberto de Mello Fagotto  
Orientador da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora  
Pontifícia Universidade Católica de Campinas

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Marcius Fabius Henriques de Carvalho  
Pontifícia Universidade Católica de Campinas

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Edson Luiz Ursini  
FT – UNICAMP

## **AGRADECIMENTOS**

A todas as pessoas que me expuseram novos horizontes e formas diferentes de pensar, muito obrigado:

Prof. Dr. Eric Alberto de Mello Fagotto, por apontar novos caminhos a serem trilhados, proporcionando o enriquecimento deste trabalho;

Prof. Dr. Antonio Carlos Demanboro, por me ajudar a despertar para a beleza da quântica e da consciência;

Prof. Dr. Davi Bianchini, que expos outras formas de olhar para a tecnologia e como ela afeta o cotidiano das pessoas;

Prof. Dr. Frank Herman Behrens, por traduzir como ninguém a experiência na indústria e na acadêmica em um diálogo sobre o mundo tecnológico contemporâneo;

Profa. Dra. Indayara Bertoldi Martins, pelo essencial apoio, dedicação e incentivo no desenvolvimento deste trabalho.

Profa. Dra. Lia Toledo Moreira Mota, por ampliar minha visão sobre sistemas de energia, em especial as novas fontes renováveis;

Prof. Dr. Marcius Fabius Henriques de Carvalho, pelas notáveis aulas, com muito *hands-on*, que permitiram utilizar de forma direta os conhecimentos adquiridos em classe na minha vida profissional;

Profa. Dra. Marina Lavorato de Oliveira, por apresentar a importância do pensar diferente na engenharia;

Meus companheiros de mestrado, Ernesto, Guilherme, Leonardo e Marcelo, pelo apoio durante nosso curso e pelo engajamento de todos em nosso trabalho social.

“A loucura, objeto de meus estudos, era até agora uma ilha perdida no oceano da razão; começo a suspeitar que é um continente.”

(Dr. Bacamarte - O Alienista - Machado de Assis)

## RESUMO

SANCHES, Carlos Alberto. **Alertor Ferroviário** - Sistema Automático de Aviso da Aproximação entre Veículos e Trabalhadores. 2019. Dissertação (Mestrado em Gestão de Redes de Telecomunicações) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2019.

Nas ferrovias, são realizadas diariamente manutenções e inspeções ao longo dos trilhos. Essas atividades, em sua maioria, ocorrem com o sistema de tráfego de trens em pleno funcionamento, o que significa que acontecem em um ambiente de risco, propício a acidentes e incidentes de trabalho. Para não haver paralisação da ferrovia e evitar acidentes com os trabalhadores, há um conjunto de regras e práticas de segurança a serem seguidas, mas elas são suscetíveis a falhas humanas. Diante disso, este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema de alerta automático aos trabalhadores ferroviários que, por meio de uma rede de sensores sem fio, informe em tempo real a aproximação de qualquer veículo ferroviário de forma individualizada, em distância suficiente para permitir que os trabalhadores tomem as ações de segurança necessárias e deixem a via antes da chegada do veículo, mitigando a possibilidade de acidentes e aumentando a segurança pessoal. Este trabalho determina a banda de frequência a ser utilizada em função da propagação dessa frequência nos diversos cenários por onde circulam os trens, identifica as distâncias alcançadas por esses alertas em diferentes condições de terrenos e ambientes, bem como utiliza um protótipo como prova de conceito.

Palavras-chave: Ferrovia. Segurança. Redes de sensores sem fios. Alertor.

## ABSTRACT

SANCHES, Carlos Alberto. **Railway Warning** - Automatic System of Warning of the Approach Between Vehicles and Railroad Workers. 2019. Dissertation (Master in Telecommunication Network Management) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2019.

On railways, maintenance and inspections are carried out daily throughout the tracks. These activities are mostly carried out with the train system in full operation, making this a risky environment, conducive to accidents and work incidents. Although there are a set of rules and practices to avoid accidents with workers, they are susceptible to human failures. Therefore, this work proposes the introduction of an automatic warning system for railway workers, which, through a wireless sensor network, reports in real time the approximation of any railway vehicle in an individualized way, and in a sufficient distance to allow the railroad worker to take the necessary safety actions and leave the tracks before the vehicle arrives, mitigating the possibility of accidents and increasing personal safety. This work determines the frequency band to be used as a function of the propagation of this frequency in the different scenarios where the trains circulate, identifies the distances reached from these warnings in different terrain and environment conditions, as well as using a prototype as proof of concept.

Keywords: Railway. Safety. Wireless sensor networks. Warning system.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Trabalhadores realizando manutenção e inspeção em ferrovia.....	14
Figura 2 – Comparação entre modais de cargas em países de mesmo porte territorial .....	18
Figura 3 – Velocidade média comercial nas ferrovias brasileiras.....	20
Figura 4 – Velocidade média de percurso nas ferrovias brasileiras .....	21
Figura 5 – Total de acidentes e acidentes fatais ou de lesão grave no Brasil.....	24
Figura 6 – Número de acidentes fatais nas ferrovias dos Estados Unidos .....	26
Figura 7 – Percentual de lesões fatais em função do horário de trabalho.....	27
Figura 8 – Detalhamento, em função do horário, dos fatores humanos dos acidentes com trabalhadores de manutenção de vias.....	28
Figura 9 – Detalhamento, em função do horário, dos fatores humanos dos acidentes com trabalhadores de manutenção de sinalização.....	28
Figura 10 – Arquitetura do projeto ALARP .....	33
Figura 11 – Sistemas de alertas automáticos disponíveis para comercialização .....	34
Figura 12 – Interferências em sistemas sem fio.....	37
Figura 13 – Atenuação corporal típica – Transceptor portátil.....	39
Figura 14 – Solução proposta .....	40
Figura 15 – Cenário típico da ferrovia em Louveira.....	43
Figura 16 – Cenário típico da ferrovia na Serra do Mar em Santos .....	44
Figura 17 – <i>Software</i> livre para predição de RF – Radio Mobile .....	45
Figura 18 – Valores de N para o mês de fevereiro.....	48
Figura 19 – Valores de N para o mês de agosto.....	49
Figura 20 – <i>Setup</i> das medidas em campo em Louveira .....	52
Figura 21 – Instrumento Gerador de RF – HP.....	52
Figura 22 – Instrumento de medidas utilizado – analisador LMR S412E .....	53
Figura 23 – <i>Setup</i> montado na Serra do Mar .....	54
Figura 24 – Equipamentos utilizados para coleta de dados na Serra do Mar .....	55
Figura 25 – Local do gerador de RF.....	56
Figura 26 – Local das medidas .....	57
Figura 27 – Geometria da propagação das ondas .....	58
Figura 28 – Rota da coleta de dados – Serra do Mar.....	59
Figura 29 – Diferenças entre o sinal predito e medido – Louveira .....	60

Figura 30 – Perfil representativo dentro da vegetação.....	61
Figura 31 – Diferenças entre o sinal predito e medido – Serra do Mar .....	62
Figura 32 – Resultado da medida de potência de saída do protótipo de 433 MHz ...	64
Figura 33 – Resultado da medida de potência de saída do protótipo de 915 MHz ...	65
Figura 34 – Protótipo com Arduino.....	66
Figura 35 – Área de cobertura 433 MHz – Louveira.....	68
Figura 36 – Detalhe cobertura Louveira – 433 MHz sentido norte .....	69
Figura 37 – Detalhe da cobertura Louveira – 433 MHz sentido sul.....	70
Figura 38 – Área de cobertura 915 MHz – Louveira.....	71
Figura 39 – Detalhe cobertura Louveira – 915 MHz sentido norte .....	72
Figura 40 – Detalhe cobertura Louveira – 915 MHz sentido sul.....	73
Figura 41 – Área de cobertura 433 MHz – Serra do Mar .....	74
Figura 42 – Detalhe cobertura Serra do Mar – 433 MHz sentido noroeste .....	75
Figura 43 – Detalhe da cobertura Serra do Mar – 433 MHz sentido oeste .....	76
Figura 44 – Área de cobertura 915 MHz – Serra do Mar .....	78
Figura 45 – Detalhe cobertura Serra do Mar – 915 MHz sentido noroeste .....	79
Figura 46 – Detalhe cobertura Serra do Mar – 915 MHz sentido oeste .....	80
Figura 47 – Protótipos de transmissores e receptores na ferrovia – Louveira .....	81
Figura 48 – Medidas na ferrovia com os protótipos.....	81
Figura 49 – Avaliação do alcance do sinal .....	82
Figura 50 – Medidas em campo com o protótipo – Louveira.....	83

## LISTA DE TABELAS

Quadro 1 – Extensão da malha ferroviária em países de mesmo porte territorial.....	19
Quadro 2 – Índice de acidentes nas ferrovias brasileiras.....	24
Quadro 3 – Índice de acidentes fatais nas ferrovias dos Estados Unidos.....	25
Quadro 4 – Amostra da planilha de medidas gerada pelo <i>software</i> de aquisição de dados .....	57
Quadro 5 – Parâmetros da predição de cobertura – Louveira em 433 MHz .....	68
Quadro 6 – Parâmetros da predição de cobertura – Louveira em 915 MHz .....	71
Quadro 7 – Parâmetros da predição de cobertura – Serra do Mar – 433 MHz .....	74
Quadro 8 – Parâmetros da predição de cobertura – Serra do Mar – 915 MHz .....	77
Quadro 9 – Distância e tempo de alertas na região de Louveira.....	83
Quadro 10 – Distância e tempo de alertas na Serra do Mar (previsão) .....	84
Quadro 11 – Custo do receptor.....	85
Quadro 12 – Custo do transmissor.....	86
Quadro 13 – Custo de EPIs comuns no setor ferroviário .....	86

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AES	<i>Advanced Encryption Standard</i>
ALARP	<i>As Low As Reasonably Practicable</i>
Alertor	Sistema de aviso baseado em sinais luminosos e sonoros
ANTF	Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários
ANTT	Agência Nacional de Transporte Terrestre
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ATWS	<i>Automatic Track Warning System</i>
CIA	<i>Central Intelligence Agency</i>
CW	<i>Carrier Wave</i>
dB	Decibel
dBm	Decibel-miliwatts
dBi	Decibel em relação a antena isotrópica
dBd	Decibel em relação a antena dipolo
DoS	<i>Denial of Service</i>
EIRP	<i>Effective Isotropic Radiated Power</i>
EPI	Equipamento de Proteção Individual
FRA	<i>Federal Railroad Administration</i>
Hz	Hertz
ISM	<i>Industrial Scientific &amp; Medical</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
ITU-R	<i>International Telecommunication Union - Radiocommunication Sector</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MHz	Megahertz
NTIA	<i>National Telecommunications and Information Administration</i>
RF	Radiofrequência
ROF	Regulamento de Operação Ferroviária
RSSB	<i>Rail Safety and Standards Board Limited</i>
RSSF	Rede de Sensores Sem Fio
RSSI	<i>Received Signal Strength Indication</i>
VMA	Velocidade Máxima Autorizada

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1	Objetivos	16
1.2	Hipótese	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>17</b>
2.1	Histórico	17
2.2	Velocidade média e máxima dos trens	19
2.3	Manutenção em vias férreas	21
2.4	Acidentes ferroviários	22
2.5	Sistema de Alertas em Ferrovias	29
2.5.1	<i>Alerta visual</i>	29
2.5.2	<i>Alerta Sonoro</i>	30
2.5.3	<i>Alertas automáticos</i>	31
2.5.4	<i>Alertas automáticos disponíveis para comercialização</i>	33
2.6	Rede de Sensores Sem Fio	35
2.7	Faixas de frequências não licenciadas	36
2.8	Área de cobertura	38
2.9	Atenuação Corporal	38
<b>3</b>	<b>SOLUÇÃO PROPOSTA</b>	<b>40</b>
<b>4</b>	<b>ESTRUTURAÇÃO DA PESQUISA</b>	<b>42</b>
4.1	Frequências adotadas	42
4.2	Locais escolhidos para simulações e testes	42
4.3	Simulação da área de cobertura por meio de software	44
4.3.1	<i>Base de dados topográfica digital utilizada</i>	46
4.3.2	<i>Cálculo por radiais</i>	46
4.3.3	<i>Frequência utilizada</i>	47
4.3.4	<i>Potência Efetivamente Irradiada</i>	47
4.3.5	<i>Altura das Antenas</i>	47
4.3.6	<i>Polarização</i>	47
4.3.7	<i>Refratividade</i>	47
4.3.8	<i>Clima</i>	49
4.3.9	<i>Parâmetros do Cálculo do Perfil</i>	50
4.3.10	<i>Calibração da ferramenta de predição</i>	50

4.3.11	Resultados das áreas de cobertura .....	50
4.4	Setup para coleta das medidas – Louveira (SP) .....	51
4.5	Setup para coleta das medidas – Serra do Mar (SP) .....	53
4.6	Coleta das medidas na região de Louveira (SP) .....	55
4.7	Coleta das medidas na região da Serra do Mar (SP) .....	57
4.8	Comparação das medidas de campo com o valor predito no <i>software</i> após calibração .....	60
4.8.1	Louveira .....	60
4.8.2	Serra do Mar .....	61
4.9	Protótipos com Arduino .....	63
5	<b>RESULTADOS</b> .....	67
5.1	Área de cobertura calibrada – Louveira .....	67
5.2	Área de cobertura calibrada – Serra do Mar .....	73
5.3	Medidas em campo com o protótipo – Louveira .....	80
5.4	Distância e tempo de alerta entre veículo e trabalhador .....	82
5.5	Comparativo de custos entre o Alertor e EPIs ferroviários .....	85
6	<b>CONCLUSÃO</b> .....	88
6.1	Trabalhos futuros .....	89
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	90
	<b>ANEXOS</b> .....	96
	Anexo A – Pedido de esclarecimento - ANTT .....	96
	Anexo B – Fotos e diagramas .....	99
	Anexo C – Códigos fonte do Arduino .....	103
	Anexo D – Tabela das medidas de campo em Louveira e Serra do Mar .....	109

## 1 INTRODUÇÃO

Devido às características do negócio, as ferrovias sofrem manutenções ao longo de seus trilhos cotidianamente por diferentes equipes em diversos locais. Isso ocorre em função das particularidades desse meio de transporte e da sua extensão, que facilmente supera centenas de quilômetros, chegando em alguns casos a milhares de quilômetros. Nesse modal não é possível parar o tráfego de trens para a execução de manutenções, pois, caso isso ocorresse, seriam tantos pontos de interrupções simultâneos que o negócio se tornaria inviável. Logo, as manutenções ocorrem concomitantemente ao tráfego ferroviário.

Entre as diversas atividades desenvolvidas ao longo das ferrovias, há inspeções nas vias realizadas por profissionais chamados de Rondas, que caminham diariamente ao longo dos trilhos e sobre eles observando as condições nos trechos percorridos, de forma a garantir a segurança e prevenir situações perigosas para esse meio de transporte.

Dessa forma, as manutenções (corretivas e preventivas) e as inspeções normalmente ocorrem sem interrupção da operação ferroviária, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 – Trabalhadores realizando manutenção e inspeção em ferrovia



Fonte: O autor

Quando há a passagem de um trem no local da prestação desses serviços, os trabalhadores param sua operação, aguardam a passagem do trem e, após isso,

retornam ao serviço, sendo que, no caso dos Rondas que percorrem a pé longos trechos diários nas ferrovias, isso é uma constante presente em todas as situações. Somente em manutenções de grande monta ou em casos específicos o trânsito de veículos na ferrovia é interrompido.

Assim, é comum a aproximação entre os veículos que circulam na via e os trabalhadores que nela estão executando atividades. Com o objetivo de evitar acidentes ou incidentes, há um conjunto de regras de operações ferroviárias que prevê esse tipo de situação e está associado a ações para mitigação de incidentes e acidentes. Como exemplo, são colocadas placas de alerta nas vias em determinadas distâncias de onde se está executando uma atividade, de forma que o condutor do veículo ferroviário possa diminuir a velocidade e também buzinar ao avistar a placa, alertando os trabalhadores da sua aproximação. Em algumas ferrovias, o condutor do veículo ferroviário também deve chamar o chefe da equipe local de manutenção via rádio e combinar a passagem do trem pelo trecho que está recebendo a manutenção, de modo que se alerte a equipe e, geralmente, se determine a velocidade em que o veículo irá circular nesse trecho.

Todas essas condições atendem boa parte das manutenções executadas nas ferrovias, porém não atendem de forma alguma as inspeções nas ferrovias pelos Rondas, pois estes estão em locais incertos ao longo das vias e sua atividade não possibilita qualquer tipo de sinalização para avisar os condutores dos veículos ferroviários da sua presença em determinado local.

No Brasil, não há estatística específica sobre acidentes com trabalhadores ferroviários, mas a Agência Nacional de Transporte Terrestre (ANTT) divulgou, em seu balanço anual de 2018, que naquele ano houve um total de 264 acidentes com mortes ou lesões graves nas ferrovias brasileiras (ANTT, 2019a).

A ANTT é o órgão governamental que regulamenta as prestações de serviço de transporte terrestre e as atividades referentes à exploração de ferrovias e rodovias federais, regulando as atividades e a prestação de serviços e fiscalizando o transporte ferroviário de cargas e de passageiros do Sistema Nacional de Viação.

## 1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de dispositivo de alerta de aproximação de veículo ferroviário, aqui definido como Alertor, que opere em uma rede de sensores sem fio para indicação da aproximação entre veículos ferroviários e trabalhadores na via.

Visa o aumento da segurança nesse ambiente por meio de advertência automática, com emissão de sinais sonoros e visuais que possam fazer com que as pessoas de posse desse dispositivo consigam identificar a aproximação dos veículos e realizar em tempo suficiente a saída segura e ordenada da via.

Como objetivos específicos, este trabalho visa a:

- I. Determinar a melhor banda de frequência para utilização desse sistema em território brasileiro;
- II. Identificar a máxima distância de operação confiável em diferentes cenários, estabelecendo qual tempo o trabalhador teria para sair da via após ser advertido no pior cenário;
- III. Desenvolver um protótipo operacional com custo próximo do de outros EPIs ferroviários.

## 1.2 Hipótese

É possível o desenvolvimento de um sistema baseado em uma rede de sensores sem fio é capaz de automatizar o aviso de aproximação entre veículos ferroviários e trabalhadores, aumentando a segurança destes em todos os ambientes ferroviários brasileiros para as diferentes velocidades em que circulam os trens, com um custo próximo do de outros EPIs já utilizados nessa área.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Histórico

O modal ferroviário caracteriza-se, especialmente, por sua capacidade de transportar grandes volumes com elevada eficiência energética, principalmente em casos de deslocamentos em médias e grandes distâncias (ANTT, 2019b).

O início das ferrovias deu-se em fevereiro de 1804, quando o inventor britânico Richard Trevithick, que contribuiu para o desenvolvimento do primeiro motor a vapor de alta pressão e para a fabricação das primeiras locomotivas a vapor ferroviárias em grande escala, realizou a primeira viagem nesse modelo. A locomotiva de Trevithick transportou, então, um trem ao longo do caminho de bonde entre Penydarren e o cais do canal em Abercynon, no País de Gales (ROLT, 1960).

Já em 1814, foram encomendados alguns motores a vapor de Trevithick para minas de prata no Peru. Sonhando com a riqueza, ele navegou para a América do Sul em 1816 e, depois de muitas aventuras, retornou à Inglaterra em 1827, para descobrir que na sua ausência outros engenheiros, especialmente George Stephenson, haviam lucrado com suas invenções (BURTON, 2002).

Naquele tempo, o aumento do volume da produção de mercadorias e a necessidade de transportá-las com rapidez para os mercados consumidores fizeram com que os empresários ingleses dessem apoio a George Stephenson, que apresentou sua primeira locomotiva em 1814. Stephenson, engenheiro inglês, construiu a “Locomotion”, que, em 1825, tracionou uma composição ferroviária trafegando entre Stockton e Darlington na Inglaterra em um percurso de 15 quilômetros, a uma velocidade próxima dos 20 km/h (NABIAS, 2014).

No Brasil, a construção de ferrovias iniciou-se em 1852, quando Irineu Evangelista de Souza (1813–1889), mais tarde Barão de Mauá, recebeu a concessão do governo para a construção e exploração de uma linha férrea no Rio de Janeiro. Inaugurada por D. Pedro II em abril de 1854, a Estrada de Ferro Mauá permitiu a integração das modalidades de transporte hidroviário e ferroviário, introduzindo a primeira operação intermodal do Brasil, ligando o Porto de Estrela à localidade de Raiz da Serra. Naquele momento, as embarcações faziam o trajeto inicial da Praça XV até o fundo da Baía de Guanabara, no Porto de Estrela, e de lá o

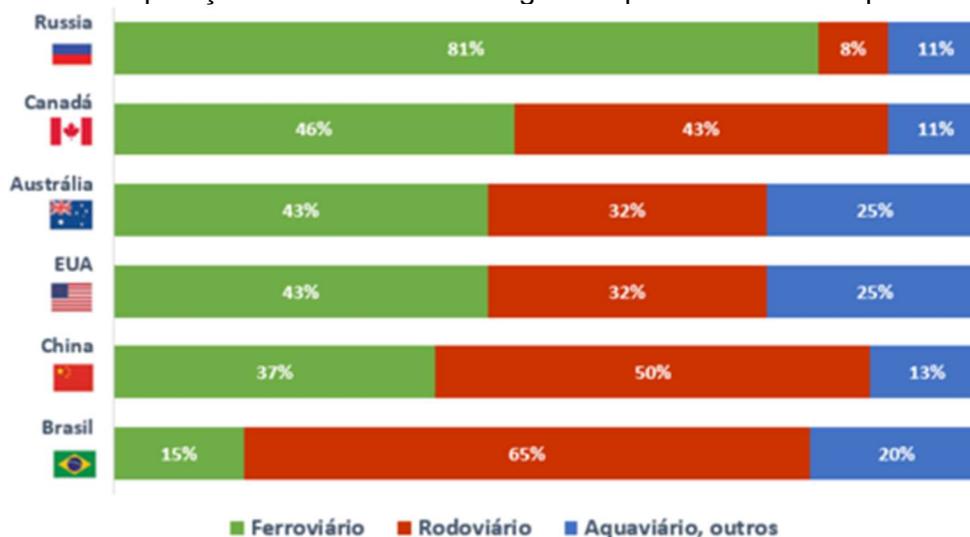
trem se encarregava do transporte terrestre até a Raiz da Serra, próximo a Petrópolis, em um trajeto de aproximadamente 14,5 quilômetros (DNIT, 2019).

Com aproximadamente 30.000 km, as ferrovias brasileiras nos dias atuais conectam diversos centros produtivos aos mais importantes portos brasileiros (VALDES, 2018), sendo que a maior parte dessa malha ferroviária é utilizada para o transporte de *commodities*, especialmente minério de ferro e grãos. Conseqüentemente, os principais eixos ferroviários são aqueles que ligam as áreas de produção/extração dessas mercadorias aos grandes centros urbanos e aos portos do país, principalmente para exportação (IBGE, 2014).

Essas ferrovias são compostas por 13 concessões, com 32 estradas de ferro, em um total de 30.6 mil quilômetros. No ano de 2017 foram transportadas 538.8 milhões de toneladas em 3.043 locomotivas e 102.024 vagões (BRASIL, 2019). Somente na concessão da ferrovia MRS logística são 1.643 quilômetros de vias de circulação, cuja malha se estende pelos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo, onde são empregados 6.016 trabalhadores diretos, dos quais aproximadamente 87% estão ligados à operação ferroviária (MRS, 2018). Somadas todas as concessionárias brasileiras, o número de empregos no setor expandiu aproximadamente 140% desde 1997, passando de 16.662 trabalhadores naquele ano para 40.398 em 2017 (ANTF, 2019a).

Ainda que esses números sejam expressivos, estão distantes dos de outros países com porte territorial similar ao brasileiro, conforme apresentam a Figura 2 e o Quadro 1.

Figura 2 – Comparação entre modais de cargas em países de mesmo porte territorial



Fonte: ANTF, 2019b.

Quadro 1 – Extensão da malha ferroviária em países de mesmo porte territorial

<b>País</b>	<b>Extensão em km</b>	<b>Ano da informação</b>
EUA	293.564	2014
China	124.000	2017
Rússia	87.157	2014
Canadá	77.932	2014
Austrália	33.343	2015
Brasil	29.850	2014

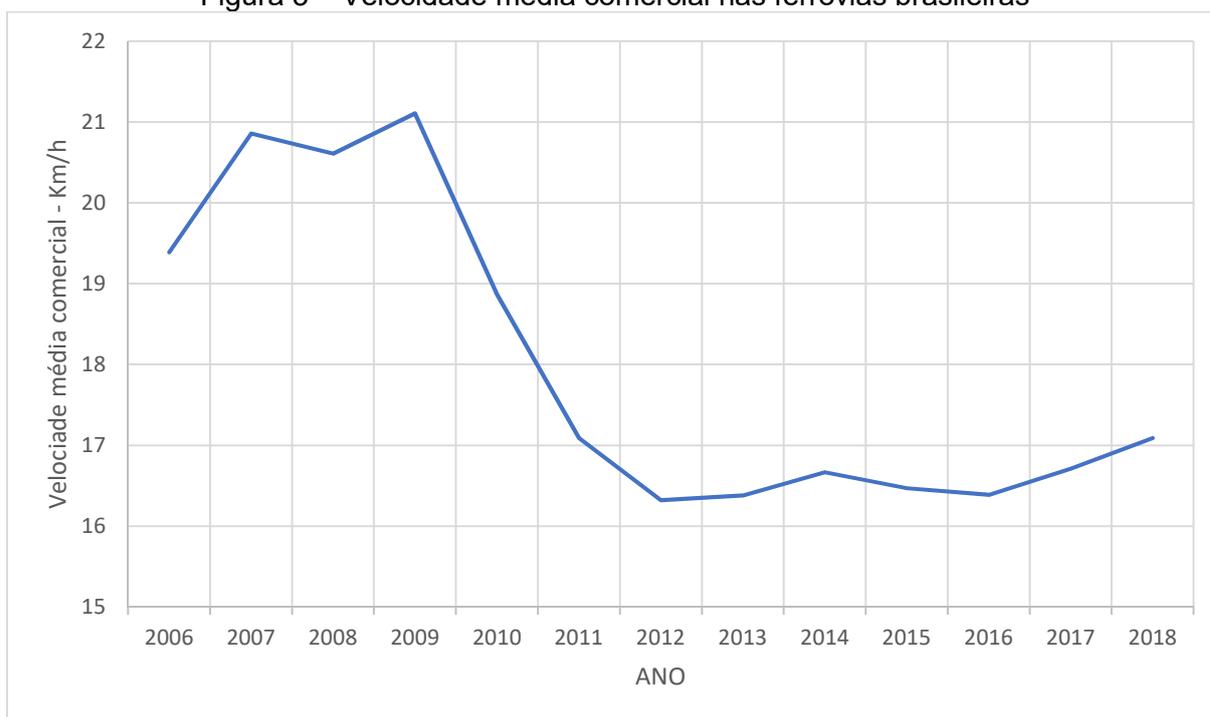
Fonte: Adaptado de United States, 2019.

Na publicação *Fatos do Mundo (World Factbook)*, disponibilizada pela Agência Central de Inteligência dos Estados Unidos, estão disponíveis informações sobre a história, as pessoas, o governo, a economia, a geografia, as comunicações, o transporte e as questões militares e transnacionais de 267 entidades mundiais (UNITED STATES, 2019b). O Quadro 1 apresenta a extensão das ferrovias em países de porte territorial similar ao do Brasil segundo esse livro.

## **2.2 Velocidade média e máxima dos trens**

A velocidade de transporte das concessões ferroviárias de carga no Brasil, quando se incluem todos os operadores, sofreu uma queda entre os anos de 2009 e 2013, manteve-se estável até 2017 e teve um pequeno aumento em 2018, quando os trens no país alcançaram 17,09 km/h de velocidade média comercial, ligeiramente superior aos 16,71 km/h de 2017 (ANTT, 2019a), conforme apresentado na Figura 3.

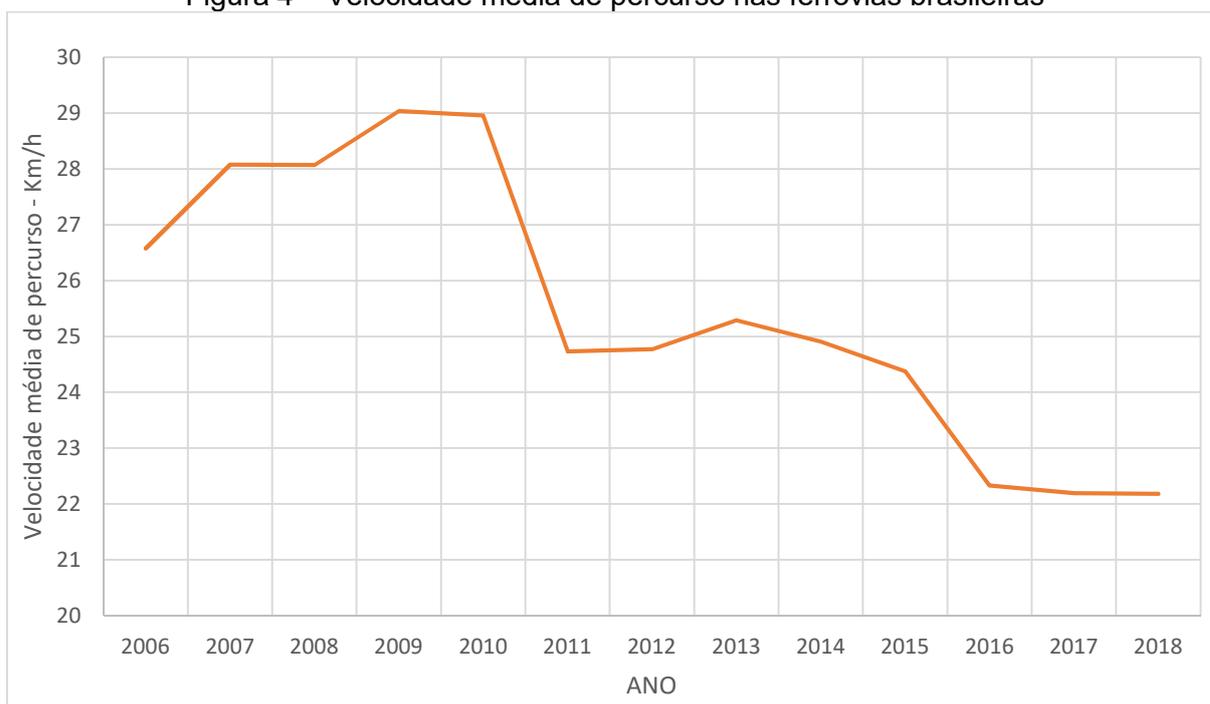
Figura 3 – Velocidade média comercial nas ferrovias brasileiras



Fonte: Adaptado de ANTT, 2019a.

A velocidade média comercial considera o tempo que o trem fica parado nas estações para carga, descarga e movimentações dos vagões. Já a velocidade de percurso é contabilizada pelo tempo que o trem leva para percorrer o trecho entre uma e outra estação. A velocidade de qualquer veículo ferroviário é influenciada por diversos elementos restritivos, tais como estado da via, áreas urbanas com passagens de nível, espera para cruzamento de trens, manutenções na via, além de obras de arte que limitam a velocidade, como túneis, viadutos e pontes (NABIAS, 2014). A variação da velocidade de percurso ao longo dos anos é apresentada na Figura 4.

Figura 4 – Velocidade média de percurso nas ferrovias brasileiras



Fonte: Adaptado de ANTT, 2019a.

A velocidade máxima que um trem pode alcançar em determinado trecho na via é significativamente superior à média, e em alguns casos a composição chega ao limite de segurança da via, que é chamado de Velocidade Máxima Autorizada (VMA). Na ferrovia Estrada de Ferro Carajás (EFC), por exemplo, a VMA do trem carregado é de 70 km/h e a do trem vazio é de 80 km/h, segundo os dados disponíveis na declaração de rede dessa ferrovia em 2017 (ANTT, 2018). A declaração de rede é documento apresentado obrigatoriamente à ANTT pelas concessionárias de serviço público de transporte ferroviário de cargas e contém um conjunto de informações a respeito da malha ferroviária federal concedida. Porém, a velocidade máxima não é constante e flutua ao longo da rota, devido a restrições de infraestrutura e a restrições operacionais permanentes (LIU; SAAT; BARKAN, 2017).

De fato, a velocidade máxima que uma composição pode alcançar com segurança em determinado trecho é estabelecida pelo raio das curvas, pela superelevação máxima, pela quantidade e tipo de vagões que nela trafegam, pelo perfil do trilho e pela Bitola da linha (STOPATTO, 1987).

### 2.3 Manutenção em vias férreas

O mundo ideal seria aquele em que todas as linhas férreas estivessem disponíveis para os trens em todos os momentos. Porém, como são necessárias as

manutenções tanto corretivas como preventivas, há uma concorrência entre a manutenção que precisa ocupar um trecho da via para execução das suas atividades e a operação que não quer parar a circulação de trens (FORSGREN; ARONSSON; GESTRELIUS, 2013). Assim, na busca de se aproximar desse mundo ideal, os operadores ferroviários disponibilizam em seus regulamentos os procedimentos que devem ser adotados para que haja o convívio harmonioso entre trabalhadores realizando as manutenções e a operação de veículos circulando nas vias concomitantemente.

Mesmo com esses procedimentos, os riscos de acidentes são altos, uma vez que os veículos ferroviários estão restritos aos trilhos e, portanto, os motoristas/maquinistas têm margens reduzidas para reagir em caso de emergências, e os trabalhadores dessa área estão mais expostos a lesões e mortes (SEMINATORE *et al.*, 2012).

A manutenção da infraestrutura das vias é considerada uma das tarefas mais perigosas no setor ferroviário. Rastrear a segurança dos trabalhadores é uma grande preocupação para o setor, já que as fatalidades e os incidentes com trabalhadores de via tendem a continuar ocorrendo a cada ano, apesar das medidas de segurança que são constantemente aprimoradas (MCCLANACHAN *et al.*, 2012).

Os procedimentos de segurança para execução de manutenção em ferrovias são determinados individualmente por cada operador ferroviário. Em geral, são parecidos e sem exceção divulgados no Regulamento de Operação Ferroviária (ROF) de cada operador, distribuídos a todos os trabalhadores. Porém, esses procedimentos não evitam as falhas humanas.

## **2.4 Acidentes ferroviários**

Os serviços de reconstituição e recondicionamento da via visam reduzir o número de acidentes decorrentes da operação, entretanto aumentam o risco de acidentes envolvendo operários (FOGLIATTI *et al.*, 2014).

De acordo com a resolução ANTT nº 1431, de 26 de abril de 2006, tem-se a seguinte definição de acidente ferroviário:

Art. 2º Para efeito desta Resolução, considera-se acidente ferroviário a ocorrência que, com a participação direta de veículo ferroviário, provocar danos a este, a pessoas, a outros veículos, a instalações, a

obras-de-arte, à via permanente, ao meio ambiente e, desde que ocorra paralisação do tráfego, a animais.

Art. 3º Os acidentes ferroviários classificam-se:

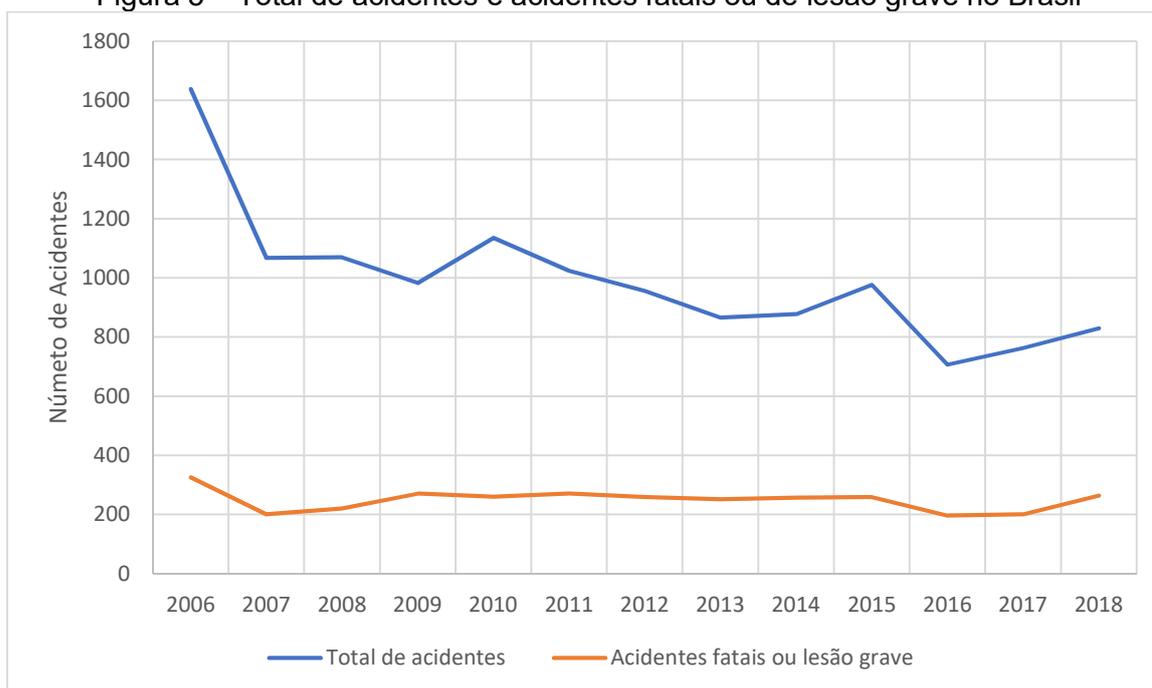
I - quanto à natureza: atropelamento, colisão, abalroamento, explosão, incêndio e descarrilamento (sem tombamento ou com tombamento total ou parcial);

II - quanto à causa: falha humana, via permanente, material rodante, sistemas de telecomunicação, sinalização e energia, atos de vandalismo e casos fortuitos ou de força maior. (ANTT, 2006)

O índice de acidentes informado pela ANTT considera a quantidade de acidentes em função da unidade *trem.km*. Segundo a ANTT (2019c), *trem.km* ou trem-quilômetro é a unidade de medida de distância que corresponde ao movimento de um trem ao longo de um quilômetro. Logo, o índice de acidente por *trem.km* trata da relação entre o número total de acidentes com a frota em tráfego e a quilometragem percorrida por essa frota, sendo internacionalmente utilizado para avaliação do nível de segurança do tráfego ferroviário.

Os dados do *Anuário 2018 da Agência Nacional de Transporte Terrestre* (ANTT 2019a) mostram que, apesar do número total de acidentes ter diminuído significativamente desde 2006, o mesmo não ocorreu com a quantidade de acidentes fatais, que se reduziu em 2007, mas aumentou em 2008 e 2009, ficando então estável até 2015. Houve uma redução em 2016, com ligeiro aumento em 2017 e maior aumento em 2018, conforme apresentam a Figura 5 e o Quadro 2.

Figura 5 – Total de acidentes e acidentes fatais ou de lesão grave no Brasil



Fonte: Adaptado de ANTT, 2019a.

Quadro 2 – Índice de acidentes nas ferrovias brasileiras

Ano	Índice de acidentes por milhão trem.km	Milhões de trem.km	Número total de acidentes	Acidentes fatais ou de lesão grave	Índice de acidentes fatais ou de lesão grave por milhão de trem.km
2006	23.3	70.31	1638	326	4.64
2007	14.08	75.83	1068	201	2.65
2008	15.31	69.89	1070	220	3.15
2009	16.07	61.17	983	271	4.43
2010	15.74	72.17	1136	260	3.6
2011	14.38	71.2	1024	271	3.81
2012	13.44	71.14	956	259	3.64
2013	12.05	71.84	866	252	3.51
2014	12.2	71.94	878	257	3.57
2015	14.05	69.56	977	259	3.72
2016	11.1	63.71	707	196	3.08
2017	11.09	68.77	763	201	2.92
2018	11.2	74.12	830	264	3.56

Fonte: Adaptado de ANTT, 2019a.

Esses dados mostram que, apesar do recuo em quase 50% do total de acidentes entre 2006 e 2018, fato que impacta diretamente o índice total de acidentes por milhão de *trem.km*, os acidentes que envolvem pessoas com lesões

graves e/ou mortes continuam nos mesmos níveis ao longo dos anos, ou seja, as tecnologias e os processos adotados até agora na segurança ferroviária foram capazes de impactar positivamente a redução dos acidentes envolvendo equipamentos, mas não tiveram o mesmo êxito com a segurança das pessoas.

O índice de acidentes com trabalhadores em ferrovias é expressivo. Segundo Chau *et al.* (2004), na França a taxa de incidência anual de acidentes de trabalho com licença médica de trabalhadores ferroviários é de cerca de 4% do total, sendo que o erro humano e a *performance* degradada do trabalhador estão associados a mais de 80% de todos os acidentes ferroviários em todo o mundo (KYRIAKIDIS; MAJUMDAR; OCHIENG, 2018).

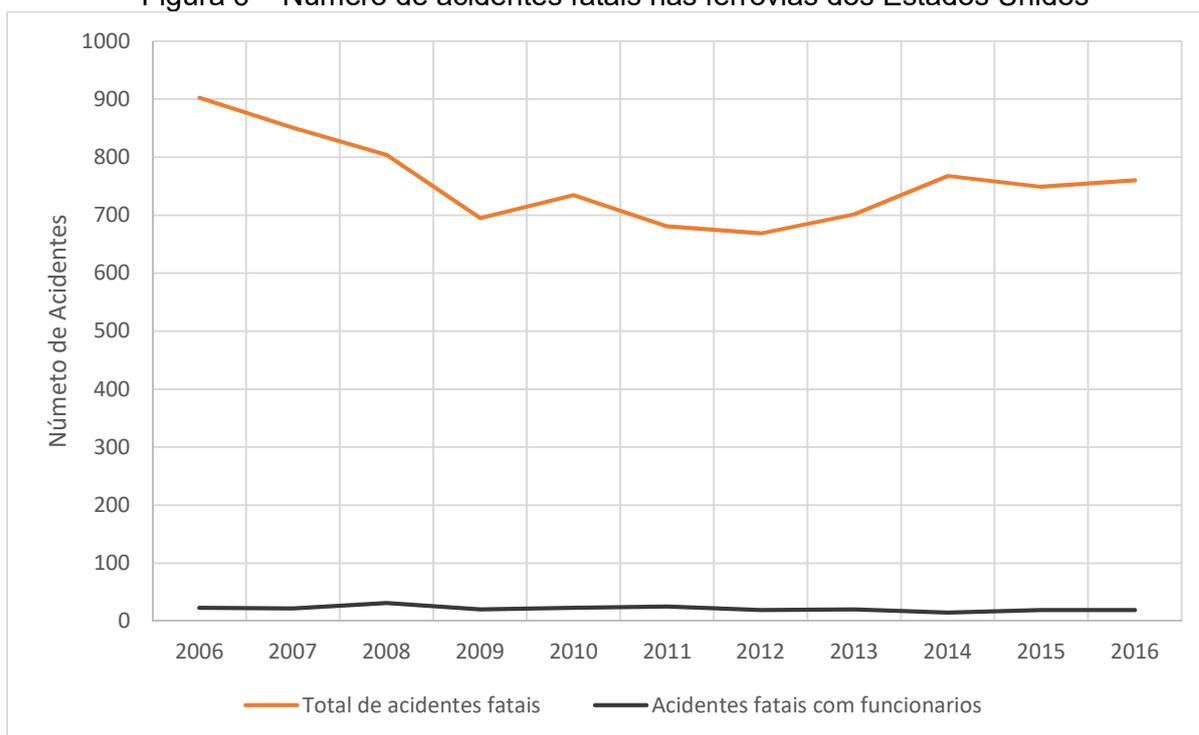
O Quadro 3 apresenta um comparativo entre os anos de 2006 e 2016 com número total de acidentes fatais, bem como o número de acidentes com funcionários e seus índices por milhão de *trem.km* nos Estados Unidos (UNITED STATES, 2019a). A Figura 6 apresenta de forma gráfica o número de acidentes fatais envolvendo trabalhadores e não trabalhadores do setor ferroviário.

Quadro 3 – Índice de acidentes fatais nas ferrovias dos Estados Unidos

<b>Ano</b>	<b>Milhões de trem.km</b>	<b>Número total de acidentes fatais</b>	<b>Acidentes fatais com funcionários</b>	<b>Índice total de acidentes fatais por milhão de trem.km</b>	<b>Índice de acidente fatais com funcionários por milhão de trem.km</b>
2006	900.17	903	23	1.003144	0.0260
2007	869.56	851	22	0.978656	0.0250
2008	838.76	804	31	0.958558	0.0370
2009	697.98	695	20	0.995731	0.0290
2010	761.45	735	23	0.965264	0.0300
2011	789.3	681	25	0.862790	0.0320
2012	800.24	669	19	0.835999	0.0240
2013	806.37	702	20	0.870568	0.0250
2014	829.07	768	15	0.926339	0.0180
2015	791.34	749	19	0.946496	0.0240
2016	724.55	760	19	1.048927	0.0260

Fonte: Adaptado de United States, 2019a.

Figura 6 – Número de acidentes fatais nas ferrovias dos Estados Unidos



Fonte: Adaptado de United States, 2019a.

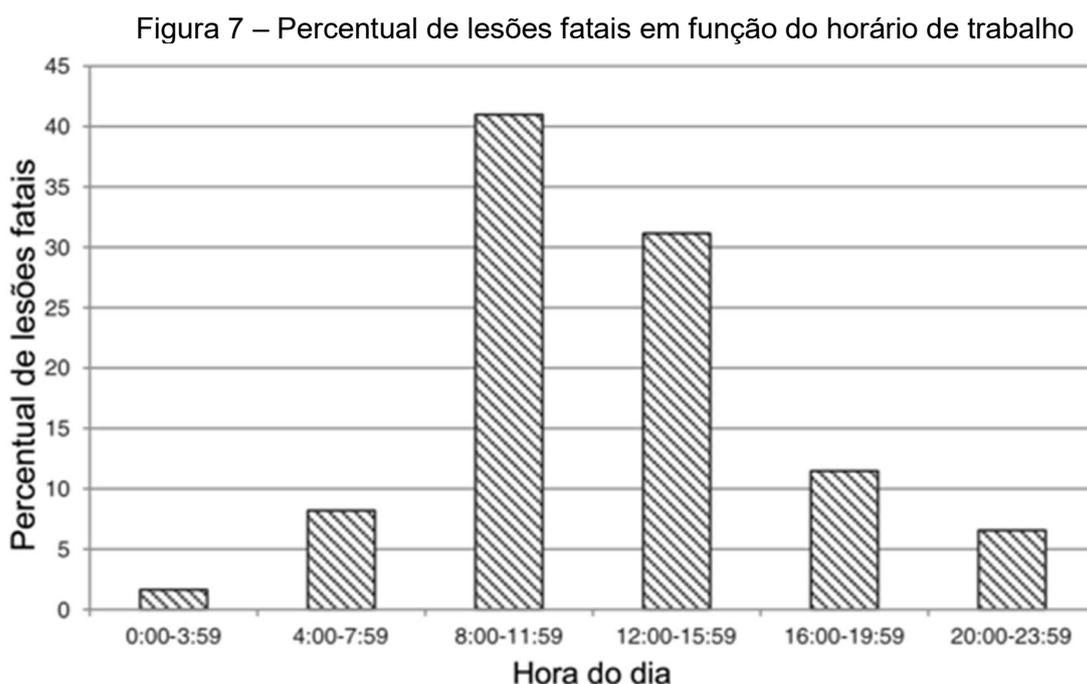
Já para o ano de 2017, os dados da *Federal Railroad Administration* (FRA, 2019), agência do Departamento de Transporte do Estados Unidos, mostraram que houve 10 mortes e 2.590 acidentes não fatais envolvendo somente trabalhadores ferroviários naquele país.

Segundo Krokos e Baker (2007), há pouca dúvida de que o erro humano contribui para a gravidade dos incidentes e acidentes que ocorrem em sistemas complexos, incluindo o sistema ferroviário. Cerca de 70% a 90% dos acidentes de transporte são, direta ou indiretamente, resultado de erro humano. Nas últimas décadas, com o desenvolvimento da tecnologia, houve um aumento da confiabilidade dos equipamentos, porém a confiabilidade humana permaneceu inalterada no mesmo período. Conseqüentemente, o erro humano hoje é considerado como a fonte mais significativa de acidentes ou incidentes em sistemas críticos de segurança (DE FELICE; PETRILLO, 2011).

Uma maior taxa de erro humano devido à fadiga foi encontrada em estudos experimentais controlados. A fadiga consegue reduzir o desempenho de várias maneiras e pode resultar em ferimentos. Verificou-se que ela produz tempos de reação mais lentos e lapsos em atividades psicomotoras, como o aumento na invasão de pistas, durante uma tarefa de direção simulada (BAULK *et al.*, 2008).

Um estudo realizado nos EUA com o objetivo de avaliar como a hora do dia afeta o risco de ferimento de funcionários de manutenção da ferrovia analisou 15.654 lesões graves em trabalhadores entre os anos 1997 e 2014, e mostrou que, embora o número de lesões tenha sofrido uma variação substancial entre esses anos, a porcentagem de feridos fatais em cada hora do dia exibe uma distribuição similar. Sendo a falta de consciência situacional, a falta de comunicação e o não cumprimento dos procedimentos os problemas mais frequentes dos fatores humanos identificados nos relatórios de fatalidades, cada uma dessas causas foi identificada em pelo menos metade dos relatórios de fatalidade, e todas as três causas ocorreram juntas em 11 de 59 fatalidades analisadas (MCLNNIS *et al.*, 2017).

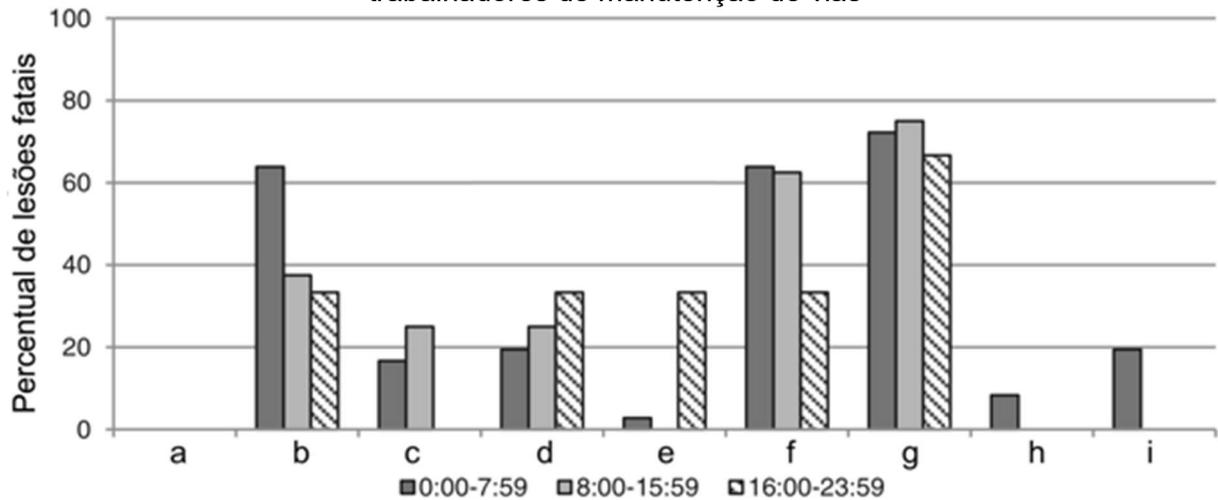
A Figura 7 apresenta o percentual de fatalidades em trabalhadores ferroviários nos Estados Unidos em função do horário de trabalho.



Fonte: adaptado de McInnis *et al.*, 2017.

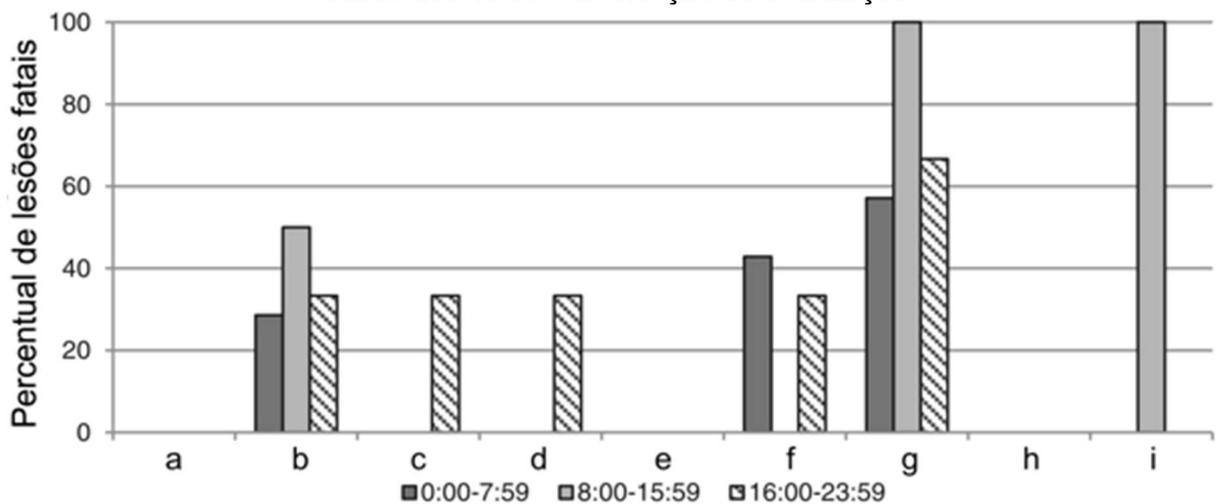
As Figuras 8 e 9 apresentam, em função do horário, quais foram os fatores humanos determinantes para as fatalidades em trabalhadores ferroviários de duas categorias nos Estados Unidos: o de manutenção de vias e o de manutenção de sinalização.

Figura 8 – Detalhamento, em função do horário, dos fatores humanos dos acidentes com trabalhadores de manutenção de vias



Fonte: Adaptado de McInnis *et al.*, 2017.

Figura 9 – Detalhamento, em função do horário, dos fatores humanos dos acidentes com trabalhadores de manutenção de sinalização



Fonte: Adaptado de McInnis *et al.*, 2017.

Fatores humanos (Figuras 8 e 9):

a - Carga de trabalho

c - Confusão

e - Obediência aos procedimentos

g - Distração

l - Treinamento e qualificação

b - Falta de comunicação

d - Fadiga

f - Consciência situacional

h - Pressão no trabalho

Os trabalhos relativos a manutenções de via envolvem a troca de dormentes, a colocação de trilhos, soldas, a colocação de brita etc., enquanto os trabalhos de manutenção de sinalização envolvem a parte elétrica, eletrônica e de automação ao longo das linhas, tais como sinaleiros, chaves e sensores (NABIAS, 2014).

O maior perigo para os trabalhadores das ferrovias é ser atingido por um veículo ferroviário em movimento. As formas primárias de proteção contra a aproximação de veículos ferroviários e trabalhadores são basicamente as seguintes: um vigia para fornecer avisos de aproximação; o controle do trecho impedindo que os trens operem em uma zona de trabalho por um período limitado de tempo; uma via deixada fora de serviço; e a detecção individual de trens, exigindo que o trabalhador solitário (e.g. Ronda) detecte visualmente a aproximação de um trem pelo menos 15 segundos antes da chegada deste ao local de trabalho e se mude para uma área segura. Essas proteções são necessárias porque um trem de carga que viaja a toda velocidade tem muita inércia, sendo praticamente impossível que pare a tempo de evitar um acidente, mesmo que o maquinista aviste um trabalhador na via (MCLNNIS *et al.*, 2017).

## **2.5 Sistema de Alertas em Ferrovias**

No ambiente ferroviário são instituídos alguns tipos de alertas que, atuando sozinhos ou conjuntamente, visam à redução dos acidentes e incidentes (FRA, 2011).

### **2.5.1 Alerta visual**

O alerta visual é basicamente constituído de placas de sinalização que são colocadas na região de interesse. Por exemplo, se o objetivo é proteger uma área onde há uma equipe trabalhando, placas informando essa situação precisam ser colocadas a uma distância considerável em ambos os lados dessa zona para fornecer advertência aos motoristas de veículos ferroviários. Para isso, um funcionário deve percorrer uma distância considerável em ambas as direções para a instalação das placas de aviso (FRA, 2011).

O aviso por meio de placas de sinalização tem o conceito de avisar ao motorista do veículo ferroviário a presença de trabalhadores adiante, mas não avisa aos trabalhadores a chegada do veículo, por isso é necessário o aviso sonoro. Dessa forma, quando o motorista do veículo ferroviário avista a placa, ele reduz a velocidade e inicia o(s) aviso(s) sonoro(s), conforme a regulamentação de cada operador, ditada pelo ROF.

Segundo a *Rail Safety and Standards Board Limited* (RSSB, 2015), um trem que se aproxima deve ser claramente visível e reconhecível como um trem para os membros da equipe de via, além do público em geral, e as luzes do farol do trem devem dar um aviso do trem se aproximando na velocidade máxima autorizada (VMA), com tempo suficiente para permitir que os trabalhadores de via ou próximos da linha se movam para uma posição de segurança. Para os trabalhadores da via trabalhando sozinhos, à noite, um tempo de aviso de 15 segundos é considerado adequado; para os trabalhadores de via trabalhando durante o dia, sob a proteção de vigias, considera-se adequado 45 segundos de tempo de aviso.

### 2.5.2 *Alerta Sonoro*

Uma vez identificadas as placas de alerta da presença de trabalhadores, o motorista/maquinista do veículo ferroviário executa o aviso de alerta sonoro através da buzina do veículo, de acordo com o procedimento de cada operador ferroviário.

Para que a buzina de alerta do veículo ferroviário seja eficaz, ela precisa ser claramente audível e reconhecida sob várias condições ambientais e de clima, e a uma distância do veículo que permita ao ouvinte tomar as medidas adequadas. A potência de som necessária para atingir esse requisito dependerá do ruído de fundo no local, da capacidade auditiva do ouvinte e das condições de propagação (por exemplo, cobertura do solo e condições atmosféricas).

O problema com essas variáveis, como o ruído de fundo, é que há potencialmente um amplo intervalo de valores. E isso é agravado pelo fato de que, como os avisos sonoros disparados pelos operadores de veículos ferroviários têm um curto período de tempo (normalmente 1 a 2 s), o ruído de fundo precisa ser considerado nesse mesmo período. Também é necessário lembrar que nenhuma buzina será audível em todas as condições de ruído de fundo. Problemas com o aviso sonoro também podem ocorrer com condições meteorológicas adversas. Por exemplo, sob algumas combinações de gradiente de temperatura atmosférica, umidade, velocidade e direção do vento o som pode ser difratado para cima, longe do ouvinte, criando então uma zona de sombra (HARDY; JONES, 2006).

Também nas ferrovias é mandatário o uso de EPIs diversos, entre eles o protetor auricular ou abafador, que implica diretamente a redução da percepção da buzina do trem em algumas situações. Um estudo avaliando a audibilidade com

protetores auditivos em ferrovias considerando motoristas de trens, agentes de plataformas e trabalhadores de via, com sinais de alertas e ruídos de fundo típicos de cada trabalho, mostrou que, de 32 situações testadas, os protetores auriculares melhoraram a percepção em 11 situações, deterioraram-na em 10 e não tiveram efeito significativo em 11 situações. A deterioração diz respeito essencialmente aos sinais que têm baixa energia na faixa de frequência abaixo de 1500 Hz, quando precisam ser ouvidos em ruídos de fundo que dominam esta faixa de frequência (ARZ; GETTLIFFE; DELATTRE, 2018).

Segundo a *Rail Safety and Standards Board Limited* (2015), um trem que se aproxima deve ser claramente audível e reconhecível como um trem para os membros da equipe de via e público em geral, e a buzina de aviso de um trem em aproximação precisa ser audível a uma distância de ao menos 400 m ao longo da via.

### 2.5.3 Alertas automáticos

Uma vez que nenhuma atividade industrial é totalmente isenta de riscos, empresas e reguladores em todo o mundo exigem que os riscos de segurança sejam reduzidos a níveis que sejam tão baixos quanto razoavelmente praticável, do inglês *as low as reasonably practicable* (ALARP).

Nesse sentido, iniciou-se na Europa em 2010 um estudo em busca de soluções de alertas automáticos para trabalhadores em ferrovias por meio do projeto *As Low As Reasonably Practicable – Automatic Track Warning System* (ALARP – ATWS), sistema de aviso automático de vias ferroviárias baseado em terminais móveis pessoais distribuídos que envolveu diversos países. O objetivo do projeto era estudar, projetar e desenvolver um sistema de alerta automático inovador e mais eficiente para melhorar a segurança dos trabalhadores das vias férreas (SEMINATORE *et al.*, 2012).

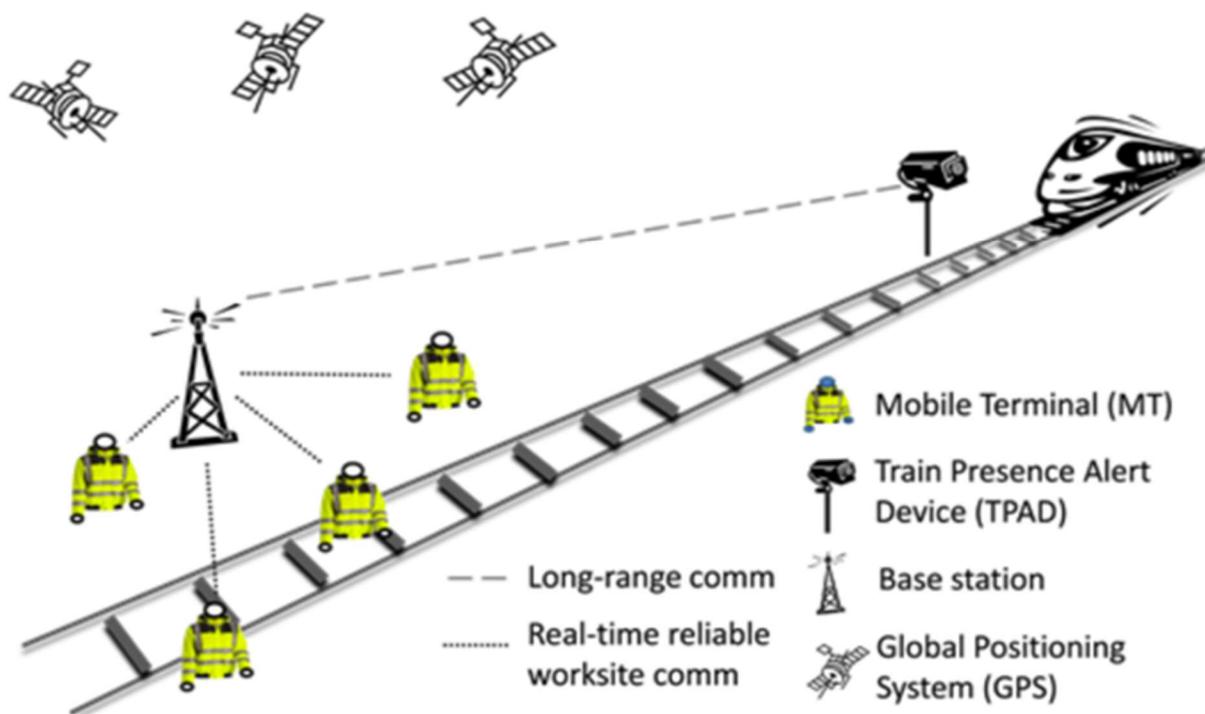
O conceito proposto foi baseado nos seguintes componentes principais: dispositivo de alerta de presença de trem (TPAD - *Train Presence Alert Device*) capaz de detectar um trem de aproximação na via interessada sem interferir no sistema de sinalização; um conjunto de terminais móveis (MT - *Mobile Terminal*) sem fio de baixo custo distribuídos, vestíveis, sensíveis ao contexto, robustos e altamente confiáveis para informar os trabalhadores sobre possíveis aproximações de trens

e/ou outros eventos que possam colocar em risco sua segurança; e comunicação do sistema baseada no protocolo 802.11 (EUROPEAN COMMISSION, 2017).

O objetivo do projeto ALARP era projetar e desenvolver um sistema inovador de alerta automático (ATWS) para melhorar a segurança geral dos trabalhadores nas ferrovias, capaz de informar os trabalhadores de via sobre eventos perigosos dentro do local de trabalho, como por exemplo a aproximação de trens. Devido à sua complexidade, o sistema ALARP está exposto a diferentes classes de vulnerabilidade. Por exemplo, um invasor poderia tentar acessar fisicamente os MTs ou os TPADs para injetar *software* mal-intencionado; poderia tentar degradar o *hardware* dos próprios componentes; poderia tentar manipular os mapas pré-carregados nos MTs para inverter zonas vermelhas e zonas verdes, ou ainda tentar explorar algumas vulnerabilidades comuns do sistema GPS (usado pelo mecanismo de localização). Em particular no sistema de comunicação que utiliza o padrão IEEE 802.11, poderia haver diferentes ataques, tais como: ataque de desautenticação, ataque por interferências ou ataque de sobrecarga na rede, causando negação de serviço (*Denial of Service – DoS*) (MONTECCHI; LOLLINI; BONDAVALLI, 2015).

O protótipo do sistema ATWS foi projetado para alertar os trabalhadores não só da aproximação de trens, mas também sobre eventos de manutenção e objetos na pista que poderiam colocá-los em risco, bem como emergências próximas. Ele também pode acompanhar sua localização e alertá-los para possíveis rotas de fuga quando necessário. A Figura 10 apresenta a arquitetura do sistema ALARP, que tem vários componentes, tais como um dispositivo de alerta de presença de trem na via e uma rede de terminais móveis sem fio de baixo custo. Durante a primeira fase, o ALARP estabeleceu as bases do sistema, incluindo a análise de risco e a definição dos requisitos e restrições do ATWS. O projeto também concluiu os protótipos iniciais do dispositivo de alerta e do terminal móvel (EUROPEAN COMMISSION, 2017).

Figura 10 – Arquitetura do projeto ALARP



Fonte: Bondavalli *et al.*, 2018.

O custo do projeto ALARP está estimado em 3.941.877 EUR, e os principais resultados alcançados até agora podem ser resumidos como a viabilidade da abordagem geral do sistema, a integração das principais características esperadas e a validação da solução técnica selecionada.

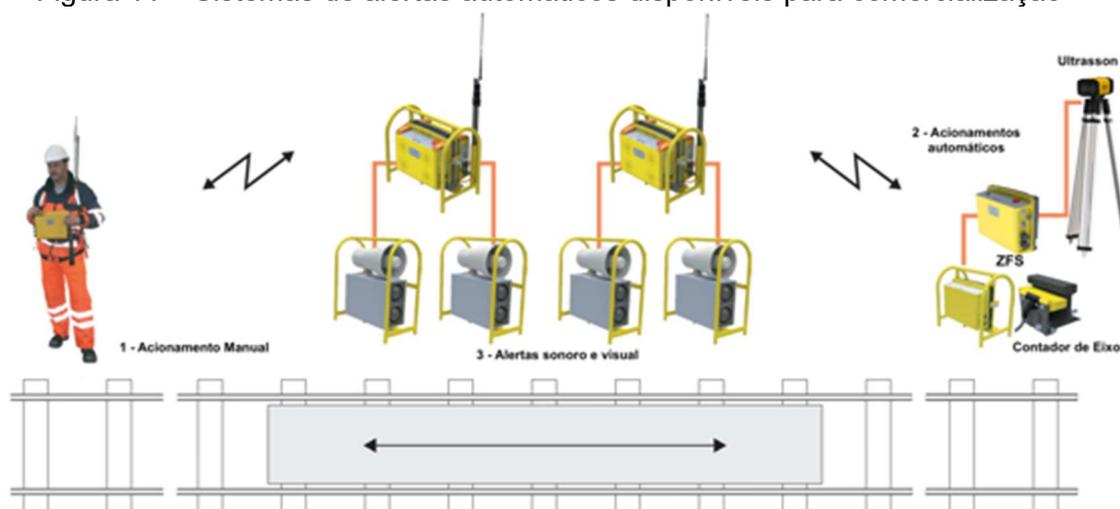
O projeto resultou no desenvolvimento de um componente de localização com base em uma abordagem híbrida de fusão de dados utilizando receptores GPS de baixo custo, aumentada por cercas eletrônicas e um modelo de mapa para melhorar significativamente o serviço do trabalhador para operar o mapeamento da zona, além de uma lógica de aplicação que contém as aplicações funcionais do dispositivo – por exemplo, sinalização de trens que se aproximam e monitoramento da saúde e da posição do trabalhador, mostrando informações através da interface homem-máquina dedicada (EUROPEAN COMMISSION, 2019).

#### 2.5.4 Alertas automáticos disponíveis para comercialização

Algumas empresas produzem e comercializam sistemas de alertas automáticos para trabalhadores de ferrovias. Porém, basicamente todos seguem os mesmos princípios de funcionamento, detectando a chegada do trem em

determinando ponto através de ultrassom ou contador de eixos, ou pela observação de uma pessoa e posterior envio do aviso de evento via radiofrequência (RF) para uma unidade remota, que fica junto aos trabalhadores que estão na via (ZOLLNER, 2019), conforme mostra a Figura 11.

Figura 11 – Sistemas de alertas automáticos disponíveis para comercialização



Fonte: Adaptado de Zollner, 2019.

A principal desvantagem desses sistemas está justamente nos métodos utilizados para detectar a presença ou chegada do trem. Caso a opção seja utilizar um trabalhador para fazer essa atividade, há que colocar dois trabalhadores em cada ponto onde houver uma equipe de manutenção, aumentando o custo desse processo, pois há várias equipes de manutenção simultâneas em uma ferrovia. Para além disso, o trabalhador pode sofrer qualquer problema de saúde e precisar abandonar o posto, causando uma falha na segurança da equipe.

O uso de equipamentos automáticos, como contador de eixos ou ultrassom, esbarra em dois aspectos. O primeiro é o tempo gasto para instalar, configurar e testar esses equipamentos, além de garantir que eles funcionarão sem qualquer supervisão por todo o tempo que for necessário, independentemente das condições do ambiente. O outro aspecto é a questão do vandalismo, pois o equipamento pode simplesmente ser danificado ou até mesmo furtado, implicando diretamente a quebra da segurança desse sistema.

Por fim, o custo de aquisição desses equipamentos é elevado se comparado com o de outros equipamentos de segurança de uso corrente nas ferrovias. Assim,

esses equipamentos hoje não são empregados nas ferrovias de países como Brasil, EUA, Canadá, México e Austrália.

## 2.6 Rede de Sensores Sem Fio

Embora pareça que as redes de sensores sem fio (RSSF) existam há tempos, as pesquisas sobre as RSSF começaram nos anos 1980, e somente a partir de 2001 elas realmente geraram maior interesse das áreas industrial e de pesquisa (ALAWAD; KAEWUNRUEN, 2018). Essas redes são utilizadas para monitorar condições físicas ou ambientais e foram inicialmente expandidas e inspiradas por aplicações militares, como a vigilância em zonas de conflito e o auxílio ao monitoramento de desastres naturais (CASTILLO-EFFER *et al.*, 2004).

Na prática, as RSSF são disseminadas e automatizadas usando uma variedade de sensores para externar dados sobre infraestrutura, estrutura, máquinas, sistemas, pessoas, maquinário, ambientes e rastreamento de alvos etc. (GHOFRANI *et al.*, 2018).

As RSSF, através de sensores individuais, interagem com o ambiente detectando fenômenos físicos nas proximidades, adquirindo dados e transportando-os para posterior processamento em outro local, normalmente através da conectividade sem fio da rede (YUAN; KANHERE; HOLLICK, 2017).

Implantações bem-sucedidas de RSSF foram demonstradas em vários domínios para aplicações de monitoramento ambiental em áreas rurais e urbanas, para monitoramento de infraestrutura, para detecção precoce de desastres naturais (como incêndios florestais e enchentes), para monitoramento industrial, além de tarefas específicas, tais como: rastreamento de objetos, monitoramento de segurança de perímetro ou objeto e monitoramento da saúde em pacientes. Na maioria das vezes, os dados adquiridos pelos sensores são enviados a um servidor central, onde são processados e disponibilizados para usuários em potencial. Porém, alguns dos usuários da RSSF precisam de informações situacionais em tempo real ou próximo do real, e assim preferem receber informações adaptadas às suas necessidades atuais diretamente da rede, para minimizar atrasos e dependência de infraestrutura central (KUMAR; CHAURASIYA, 2018).

## 2.7 Faixas de frequências não licenciadas

As ondas de rádio que se propagam entre as antenas transmissoras e receptoras são denominadas ondas eletromagnéticas. A antena transmissora transforma as variações de tensão e corrente produzidas pelo equipamento transmissor em ondas eletromagnéticas, capazes de se propagarem no espaço. A antena receptora desempenha papel contrário, transformando a energia das ondas eletromagnéticas em variações de tensão e corrente para serem processadas no equipamento receptor (MIYOSHI; SANCHES, 2008).

As faixas de frequências não licenciadas, chamadas *Industrial, Scientific and Medical* (ISM), estão alocadas mundialmente entre 7 KHz a 245 GHz no espectro e foram reservadas para fins industriais, científicos e médicos. Essas bandas originalmente foram projetadas para aplicações como micro-ondas, equipamentos médicos e lâmpadas sem eletrodos, entre outras. No entanto, ao longo dos anos, foram desenvolvidos padrões e recursos de comunicação sem fio que utilizam essas faixas e, dependendo da região da União Internacional de Telecomunicações (ITU - *International Telecommunications Union*), há uma regulamentação própria para a operação desses dispositivos. Essas regras especificam a potência máxima de transmissão, o ciclo de atividade e a periodicidade do sinal (KUMBHAR, 2017).

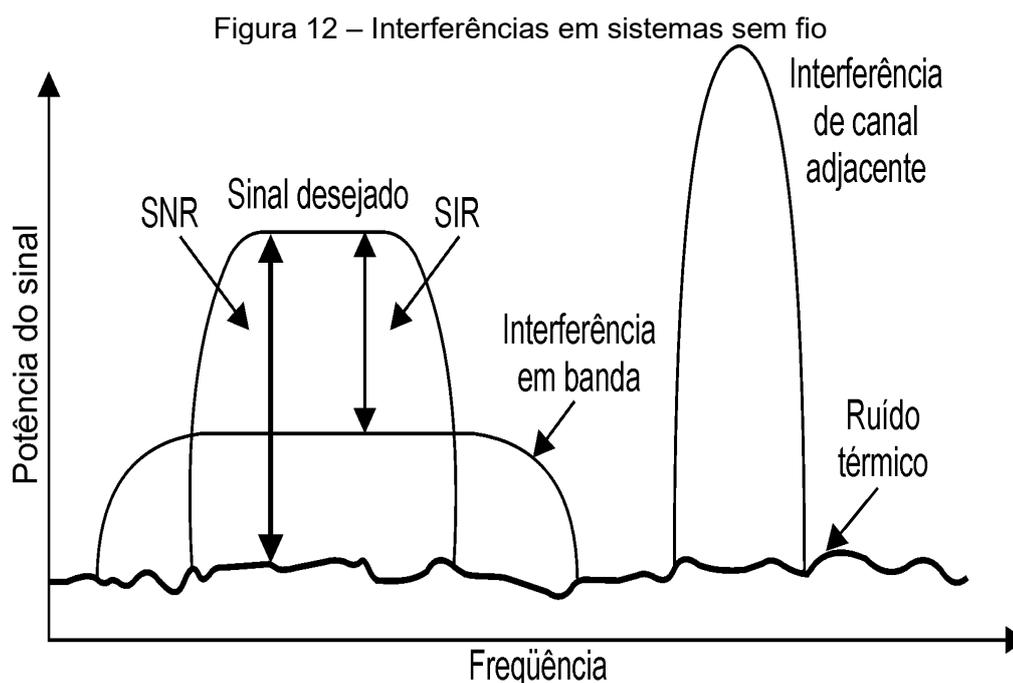
Não havendo um licenciamento específico e bastando apenas que os dispositivos que operam nessa faixa cumpram com as exigências técnicas das agências ou órgãos reguladores, esses diferentes sistemas não têm um objetivo comum e não cooperam entre si (ETKIN; PAREKH; TSE, 2007).

Nesse sentido, deve haver preocupação adicional com possíveis interferências. Como os equipamentos que operam na faixa ISM são dispensados de licença nas entidades reguladoras, bastando apenas que tenham homologação, não há como estimar problemas advindos de uma possível interferência, pois, mesmo que se visite o local da futura instalação e se realize algum tipo de medida para verificar sua viabilidade, ela somente será válida para aquele instante, como uma foto daquela situação (SANCHES, 2005).

A ITU divide o mundo em três regiões para regulamentação e gestão do espectro global de radiofrequências. Cada região tem seu próprio conjunto de alocações dessas frequências:

- ✓ Região 1: Europa, África e Oriente Médio a oeste do Golfo Pérsico, incluindo o Iraque, a antiga União Soviética e a Mongólia.
- ✓ Região 2: Américas, Groenlândia e algumas das ilhas do leste do Pacífico.
- ✓ Região 3: Eurásia, Irã e Oceania.

Apesar do Brasil estar na região 2 do ITU, onde a faixa de frequência de 433 MHz não é considerada ISM, a resolução ANATEL n° 680, de junho de 2017, juntamente com o Ato n° 14448 de dezembro de 2017, aprova e regulamenta o uso de equipamentos de radiação restrita, e permite o uso da frequência de 433 MHz sem a necessidade de qualquer licença, desde que a potência máxima irradiada seja de 10 mW EIRP, ou seja, a soma da potência do transmissor com o ganho da antena deve ser igual ou menor que 10 mW.



Fonte: Sanches, 2005.

As interferências apresentadas na Figura 12 podem ser caracterizadas basicamente em três tipos:

- a) Ruído térmico: degrada a relação sinal-ruído ou *Signal Noise Ratio* (SNR);
- b) Interferência de canal adjacente: degrada a relação sinal-interferência ou *Signal Interference Ratio* (SIR);
- c) Interferência cocanal ou em banda: degrada a relação sinal-interferência ou SIR.

## 2.8 Área de cobertura

Podemos definir como área de cobertura toda região atendida por um transmissor ou por um conjunto de transmissores com nível mínimo de sinal em que se possa fazer uma conexão, em qualquer taxa de transmissão. Por consequência, define-se como “área de sombra” toda região que esteja dentro de uma área de cobertura, mas sem sinal suficiente para que se tenha uma conexão, podendo haver várias regiões de sombra em uma mesma área de cobertura (SANCHES, 2005).

Os requisitos de cobertura para radiocomunicação nas ferrovias são significativamente diferentes de outras comunicações sem fio, porque nesse tipo de ambiente existe uma área fixa onde se pretende ter o sinal, que é a rota exata através da qual os trens circulam. Normalmente, o trajeto de uma ferrovia tem centenas de quilômetros de comprimento, mas apenas alguns metros de largura. Assim, os desafios técnicos da comunicação sem fio nas ferrovias são expressivos.

Com o desenvolvimento e a ampla aplicação das redes sem fio, a predição da propagação da onda torna-se importante para a caracterização do canal de rádio, especialmente no caso de ambientes complexos, como o ambiente ferroviário (LI *et al.*, 2015).

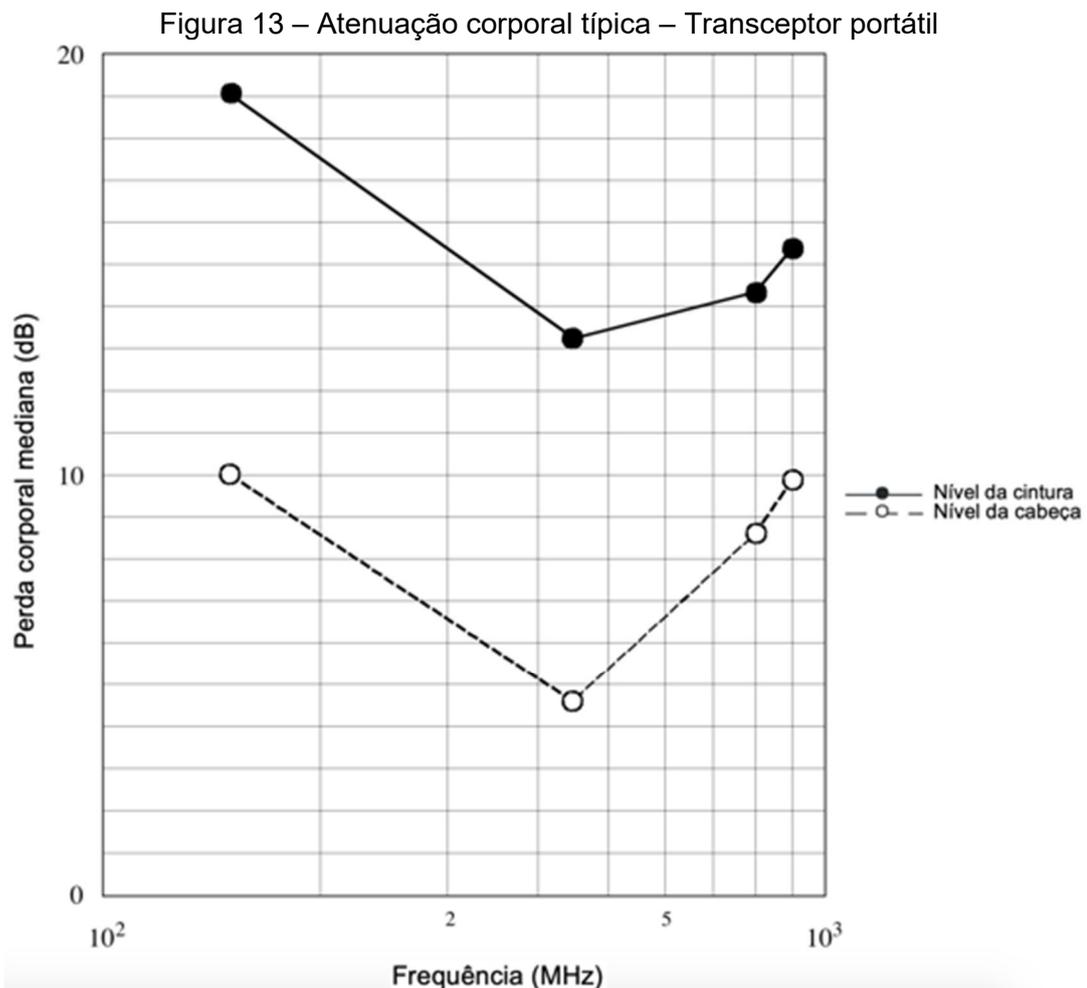
Os modelos de predição de sinais para áreas de cobertura vêm sendo estudados por pesquisadores de todo o mundo repetidamente, havendo vários modelos matemáticos para realizar a predição de sinais em áreas abertas, tais como os de Longley-Rice (RICE *et al.*, 1966), Okumura (1968), Hata (1980), ITU-R P.525 (ITU, 2016a) e ITU-R P.1411 (ITU, 2017). Com o avanço tecnológico na área de informática, os principais algoritmos de propagação foram sendo modelados para trabalhar em *softwares* específicos, com isso sofrendo alterações para a melhoria da predição do sinal (SANCHES, 2005).

## 2.9 Atenuação Corporal

A influência do corpo humano nos sistemas de comunicação sem fio tem impacto significativo na força do sinal recebido (em inglês, *received signal strength indication*, RSSI). A proximidade do corpo humano de transceptores apresenta elevadas atenuações em condições de transmissão quando o corpo do usuário

bloqueia a transmissão da linha de visada (LOS - *Line Of Sight*) entre dois dispositivos; nesse caso uma parte da onda viaja pelo corpo (ocorrendo o desvanecimento), enquanto a energia restante da onda é absorvida, refletida, difratada e dispersada (SILVA; AFONSO; ROCHA, 2017).

A presença do corpo humano no campo em torno de um transceptor portátil, telefone celular ou outro dispositivo sem fio pode degradar o desempenho efetivo da antena; quanto mais próxima a antena do corpo, maior a degradação. O efeito também é dependente da frequência. A Figura 13 mostra o resultado de um estudo da atenuação corporal sobre transceptores portáteis em quatro frequências comumente utilizadas (70, 350, 700 e 900 MHz) elaborado pela União Internacional de Telecomunicações (UIT) por meio da recomendação ITU-R P.1406-2 (ITU, 2015).



Fonte: Adaptado de ITU, 2015.

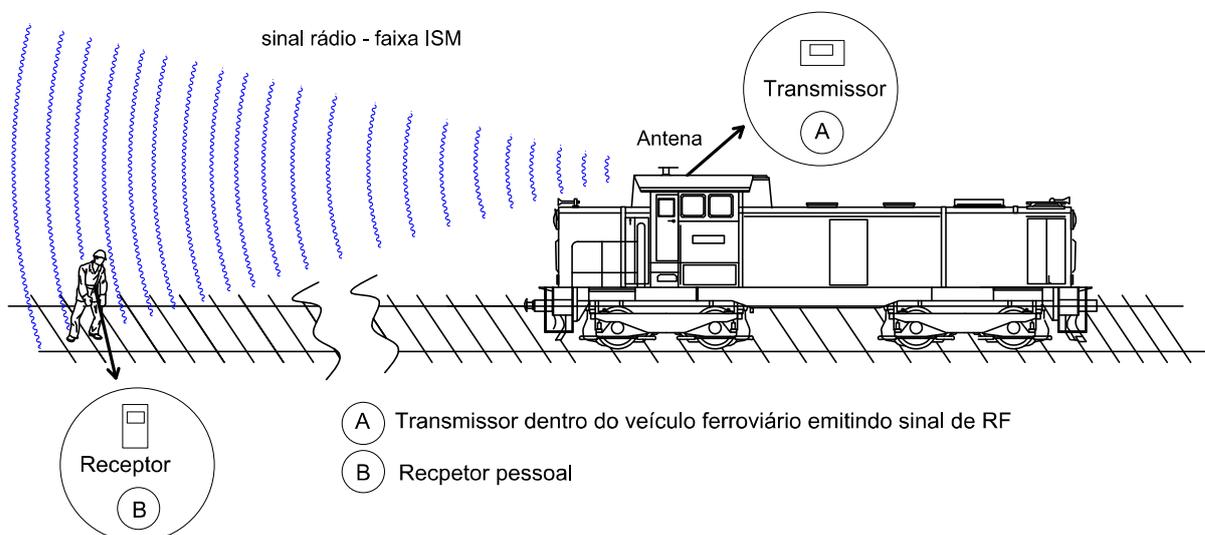
Para o equipamento fixado no nível da cintura há a pior condição; as perdas são de 14 dB para a frequência de 433 MHz e de 15,5 dB para a frequência de 915 MHz.

### 3 SOLUÇÃO PROPOSTA

O sistema proposto baseia-se no conceito de haver em cada veículo ferroviário um transmissor emitindo sinais codificados, com o número da locomotiva, com o sistema operando em faixa de frequência ISM de 915 MHz a uma potência de 30 dBm (1 Watt), conectado a uma antena de baixo perfil com ganho de 5 dBi instalada no teto do veículo e um receptor, que é disponibilizado para cada equipe, que eventualmente pode ser composta por um único funcionário em atividade na via.

Dessa forma, quando a distância entre o veículo ferroviário e o trabalhador atinge o limite operacional do sistema, o receptor identifica o sinal da locomotiva e emite os alertas visual e sonoro, indicando a aproximação do veículo conforme apresentado na Figura 14. Além disso, o receptor grava no cartão de memória o horário (*timestamp*) e o número da locomotiva que ativou o Alertor.

Figura 14 – Solução proposta



Fonte: Elaborado pelo autor.

A distância de acionamento do equipamento Alertor é variável em função das características de propagação do sinal no local onde se encontram os operários e o veículo ferroviário. Porém, em qualquer situação deve haver ao menos 15 segundos de intervalo de tempo entre o acionamento do equipamento Alertor e a chegada do veículo ao local onde esteja o trabalhador, atendendo dessa forma as recomendações do setor para esse tipo de alerta (RSSB, 2015).

Essa abordagem, além de incrementar a segurança dos trabalhadores na via, resolve alguns dos problemas dos sistemas comerciais disponíveis, tais como:

a) Dispensa o uso de dois trabalhadores a mais por equipe de manutenção nos casos em que o método de identificação da chegada do trem é visual;

b) Evita a possibilidade de vandalismo ou roubo de equipamentos, uma vez que não há qualquer dispositivo na via para identificar a proximidade do trem do local de trabalho das equipes;

c) Funciona para equipes de uma única pessoa, como é o caso dos Rondas, diferentemente de qualquer outro sistema.

O transmissor no trem envia o código com o número do trem; o receptor, ao reconhecer o código, grava no cartão de memória o número do trem e o horário em que foi recebida a mensagem. Dessa maneira, por meio de uma rede de telecomunicações dinâmica e dedicada, é disponibilizado aos trabalhadores portadores do dispositivo Alertor um serviço de aviso individual da aproximação de veículos ferroviários com foco no aumento da segurança, além de se incluir o gerenciamento dessa aproximação através de logs nos dispositivos, que podem ser utilizados pelos gestores tanto para sindicâncias em possíveis casos de incidentes ou acidentes como para aprimorar diferentes aspectos da gestão da segurança dos trabalhadores ferroviários.

**Acidente:** Acontecimento inesperado e desagradável que pode causar danos leves ou graves ao indivíduo e/ou ao bem material.

**Incidente:** Situação imprevista e que pode alterar o rumo dos acontecimentos.

## **4 ESTRUTURAÇÃO DA PESQUISA**

### **4.1 Frequências adotadas**

Para determinar qual frequência utilizar foi realizada pesquisa com a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) visando a identificação as frequências passíveis de utilização no Brasil sem a necessidade de licenciamento, as chamadas *Industrial Scientific and Medical* (ISM), que são bandas reservadas internacionalmente para o desenvolvimento industrial, científico e médico. Cada país regula as condições de uso de cada frequência.

As faixas de frequência para aplicações industriais, científicas e médicas no Brasil estão em várias pequenas porções dentro de um amplo espectro de frequências que varia de 6,7 MHz até 245 GHz. Para cada aplicação, há uma fração desse espectro que melhor atenderá os objetivos pretendidos.

Para o Alertor ferroviário, deu-se preferência para as faixas nas quais a oferta de componentes como transceptores e amplificadores fossem a mais ampla possível, visando tanto a facilidade de encontrá-los como menor custo de aquisição. Dessa forma, as faixas mais aderentes basicamente são 433 MHz, 915 MHz e 2,4 GHz, em que há uma ampla oferta de componentes a preços acessíveis. Porém, a faixa de 2,4 GHz é limitada para uso no Alertor ferroviário, devido à elevada perda por propagação se comparada com as faixas de 433 MHz e 915 MHz.

Apesar de a faixa de 433 MHz não ser considerada ISM na região 2 do ITU, onde o Brasil se encontra, a ANATEL permite seu uso sem licenciamento sob algumas condições, conforme explanado no item 2.7.

Assim, as análises das regras e condições de uso foram realizadas nas faixas de frequência de 433 MHz e 915 MHz, uma vez que a resolução ANATEL n° 680 de junho de 2017 e o Ato n° 14448 de dezembro de 2017 aprovam e regulamentam o uso de equipamentos de radiação restrita para ambas as faixas de frequência.

### **4.2 Locais escolhidos para simulações e testes**

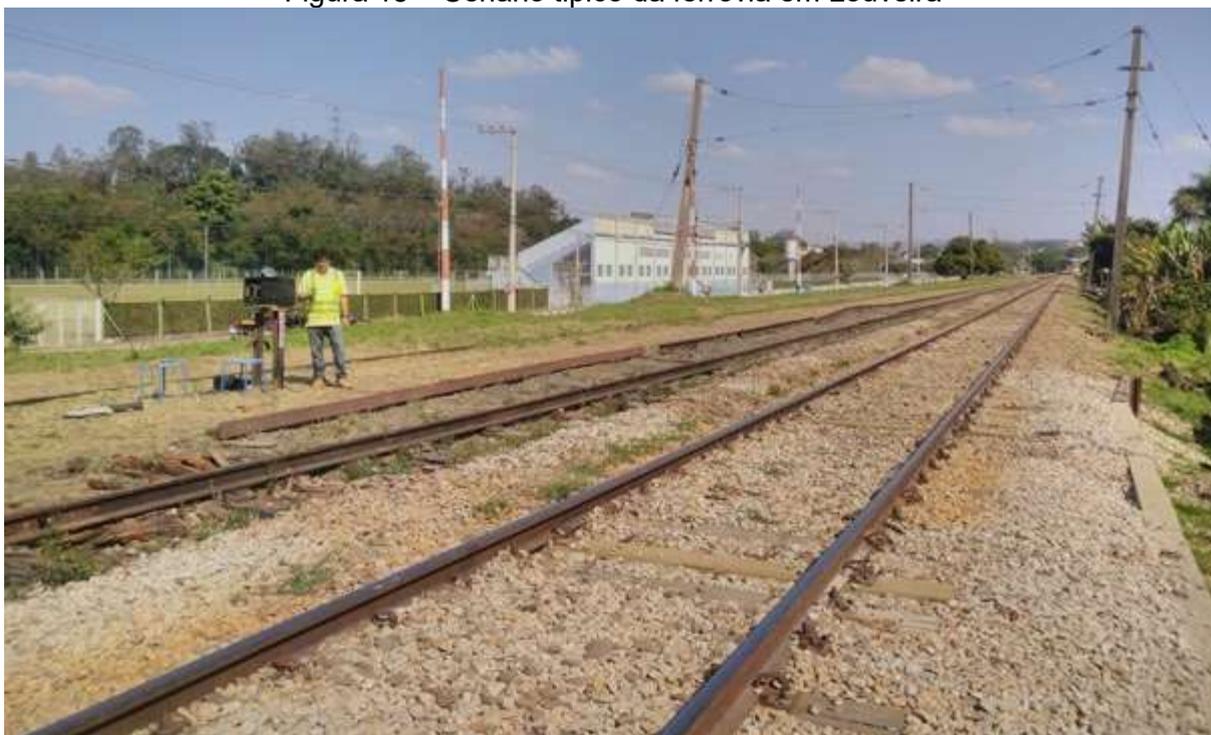
Visando realizar os testes e simulações em locais que melhor representem as ferrovias brasileiras, buscou-se dois trechos ferroviários no estado de São Paulo que oferecessem dois tipos distintos de ambientes para a propagação dos sinais de RF:

um que retratasse a condição costumeira encontrada na maioria das ferrovias e outro que reproduzisse um ambiente hostil para propagação do sinal de rádio, representando situações que, apesar de não serem típicas, podem ocorrer em algumas pequenas áreas dentro da malha ferroviária brasileira.

Dessa forma, foi selecionado um trecho ferroviário na cidade de Louveira caracterizado por terreno plano, com poucas curvas e alguma vegetação, e outro trecho na Serra do Mar, em Santos, constituído de várias curvas no traçado da ferrovia, com topografia acidentada e muita vegetação.

Esses dois trechos, apesar de serem um pequeno extrato do todo, reúnem as condições necessárias para validação dos testes de propagação de RF. Um cenário típico da região de Louveira é apresentado na Figura 15.

Figura 15 – Cenário típico da ferrovia em Louveira



Fonte: O autor

A região escolhida em Louveira é uma área plana de fácil acesso, com pouca vegetação, com a ferrovia fazendo uma ligeira curva à direita no sentido norte, sem nenhuma vegetação nem qualquer curva no sentido sul.

Já a ferrovia na região da Serra do Mar, em Santos, atravessa a Mata Atlântica, que é uma floresta caracterizada por uma grande variedade de espécies, organismos densos com copas contíguas e ambiente interno denso, quente e úmido.

Esse ambiente compreende três fisionomias florestais principais: floresta ombrófila densa, floresta estacional semidecidual e decidual sazonal.

As alturas das árvores circundantes no corredor do trem variam de 15 a 30 metros, e a largura total do corredor não excede 15 metros. Um cenário típico é apresentado na Figura 16.

Figura 16 – Cenário típico da ferrovia na Serra do Mar em Santos



Fonte: O autor

### 4.3 Simulação da área de cobertura por meio de software

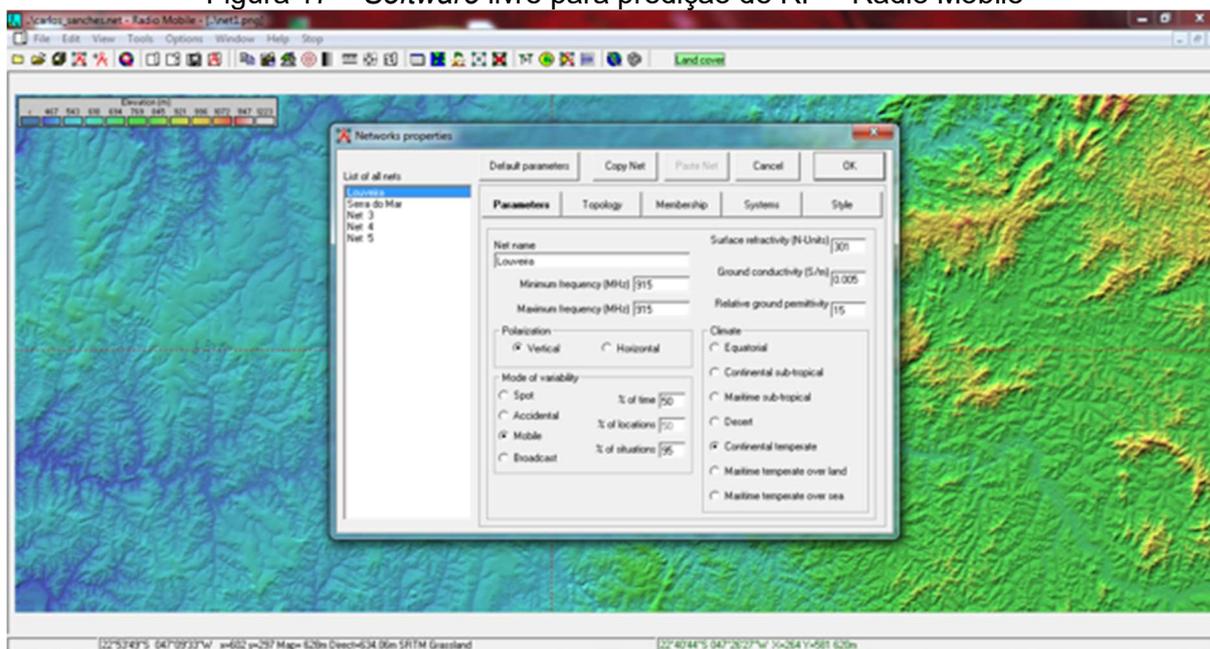
Por meio da predição da área de cobertura é possível determinar a distância de funcionamento do Alertor com relação ao transmissor instalado no veículo ferroviário, e conseqüentemente o tempo que o trabalhador terá entre o recebimento do alerta de aproximação e a chegada desse veículo. Os estudos de propagação dos sinais de rádio nos ambientes propostos servem para avaliar qual a cobertura atingida por diferentes frequências em diferentes locais, simulando a utilização de transmissores nos veículos e receptores junto aos trabalhadores ao longo da via.

As características da propagação de um sinal de RF dependem basicamente da frequência utilizada, da geografia do terreno, da vegetação, de edifícios e de condições climáticas da região em estudo. Logo, o método mais eficiente para essa predição é a utilização de *softwares* que simulem a área de cobertura no ambiente

proposto, auxiliando a determinar se os objetivos pretendidos podem ser alcançados.

Para este estudo foi utilizado o *software* Radio Mobile (2019), que é uma ferramenta *freeware* desenvolvida para esse tipo de análise. A Figura 17 apresenta a interface principal dessa ferramenta.

Figura 17 – *Software* livre para predição de RF – Radio Mobile



Fonte: Adaptado de Coudé, 2019.

O *software* Radio Mobile (COUDÉ, 2019) utiliza o modelo matemático de Longley-Rice (RICE *et al.*, 1966) para predição de cobertura; inserindo as informações da região pretendida, tais como coordenadas geográficas, frequência, altura de antenas, potência etc., tem-se a predição para aquela região. Porém, como em qualquer ferramenta de predição de cobertura, para um aumento na precisão da simulação há a necessidade de calibração/validação dos parâmetros utilizados. Logo, foram realizadas medidas em campo na região de Louveira e na Serra do Mar para calibração/validação dos parâmetros utilizados no *software*, tornando sua predição mais próxima da situação real.

O método de previsão utilizado por esse *software* é baseado na teoria eletromagnética e em análises estatísticas de características do terreno e medições de sinais de rádio. Ele prevê a atenuação mediana das ondas em função da distância e da variabilidade do sinal no tempo e no espaço.

O modelo explica as condições do solo, o clima em relação à constante dielétrica, a refratividade da superfície, a condutividade do solo e o tipo de ambiente. O modo de predição móvel do *software* é utilizado para unidades que estão se movendo durante a comunicação, que é exatamente o caso do veículo ferroviário se movimentando nas vias. Assim, a variabilidade de situação e de tempo são combinadas, já que, para uma unidade de rádio móvel, as mudanças de situação se traduzem em mudanças no tempo cujo efeito produz mudanças nas estatísticas observadas.

A seguir, são apresentados os detalhes da ferramenta para predição de cobertura.

#### 4.3.1 *Base de dados topográfica digital utilizada*

Os arquivos da base de dados utilizada para os cálculos de predição de área de cobertura do Alertor foram obtidos através do banco de dados de topografia digital *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*, versão 3.0. O dado básico fornecido pelo banco de dados SRTM é a altura relativa a uma superfície de referência; a precisão para a América do Sul é de 1 arco-segundo, o que representa um ponto a cada 30 metros.

#### 4.3.2 *Cálculo por radiais*

O *software* prediz a perda na transmissão eletromagnética relativa ao espaço livre, considerando terrenos com irregularidades dentro de uma média determinada.

Para a execução de área de cobertura, o *software* utiliza o método ponto a ponto por cálculo de radiais, determináveis em seu intervalo entre si, com intervalo mínimo de 0,01 grau entre radiais e intervalo máximo de 5 graus entre radiais. Nas predições executadas, o intervalo utilizado foi fixado em 0,01 grau, com o comprimento das radiais limitado a 3 km.

Desse modo, o *software* calculou 36.000 radiais com 3 km de extensão a partir do ponto de localização da estação transmissora para cada predição realizada. O *software* também considera a atenuação no espaço livre, a perda por difração, perdas no sistema aéreo, a potência e a frequência de transmissão.

#### 4.3.3 *Frequência utilizada*

As simulações foram executadas em duas faixas de frequências, a de 433 MHz e a de 915 MHz.

#### 4.3.4 *Potência Efetivamente Irradiada*

A potência efetivamente irradiada é calculada pelo *software* utilizando parâmetros de potência de transmissão, perda nos cabos e conectores, além do ganho das antenas.

#### 4.3.5 *Altura das Antenas*

Para os testes com o protótipo foram consideradas alturas de antenas constantes nos quadros 5 e 6 do Capítulo 4. Para predição do sistema definitivo deve ser considerada a altura de 4 metros do solo para o transmissor e 1 m para o receptor, simulando que o receptor estivesse preso à cintura de um trabalhador ferroviário e o transmissor, no teto de uma locomotiva.

#### 4.3.6 *Polarização*

O *software* permite seleção da polarização, definida pelo vetor do campo elétrico, tanto vertical quanto horizontal, assumindo por padrão que tanto o transmissor como o receptor operarão na mesma polarização; em todas as simulações realizadas foi adotada a polarização vertical.

#### 4.3.7 *Refratividade*

A refratividade da atmosfera determina a possibilidade de as ondas eletromagnéticas serem desviadas ou refratadas devido a diferenças atmosféricas. No *software*, existem três modos distintos de se definir a refratividade:

- a) Definição de refratividade expressa em unidades N, por um valor inteiro, compreendido entre 250 e 400;

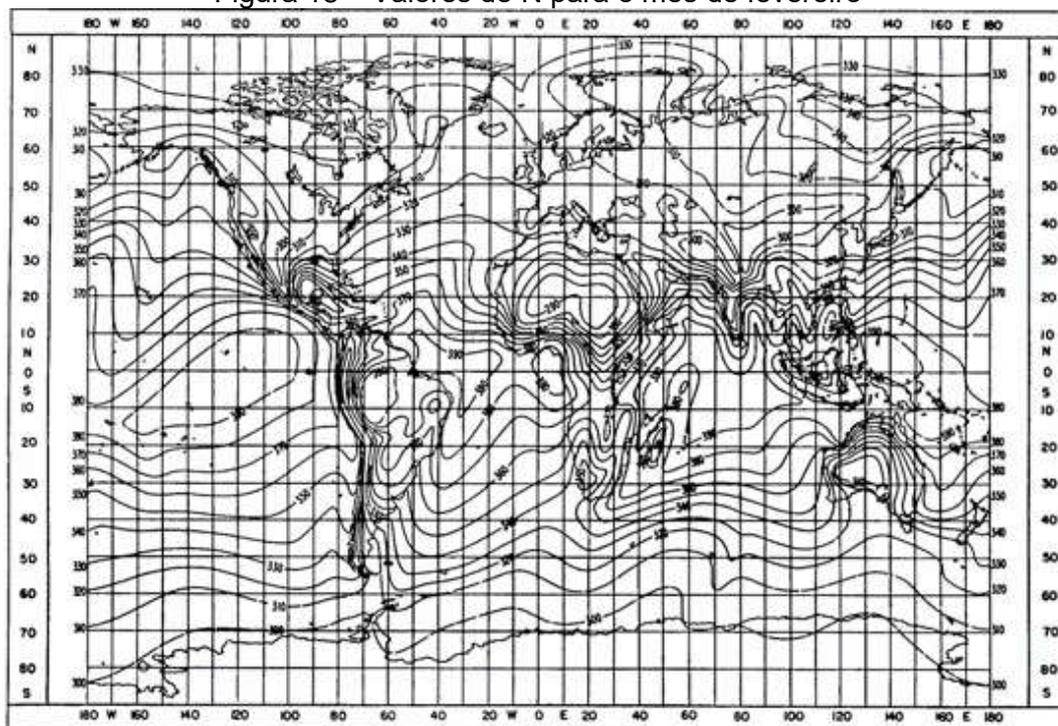
- b) Entrada do raio de curvatura terrestre  $K$ , expresso em um número real. O fator  $K$  adotado foi de  $4/3$ , ou  $1.333$ , que é convertido em unidade  $N$  pela seguinte função matemática:

$$N = 179,3 \times \text{Ln} \left[ \frac{1}{0,046665} \left( 1 - \frac{1}{K} \right) \right]$$

- c) Entradas do valor da refratividade referenciado ao nível do mar,  $N$ . A refratividade de superfície  $N_s$  será calculada baseada na elevação do percurso.

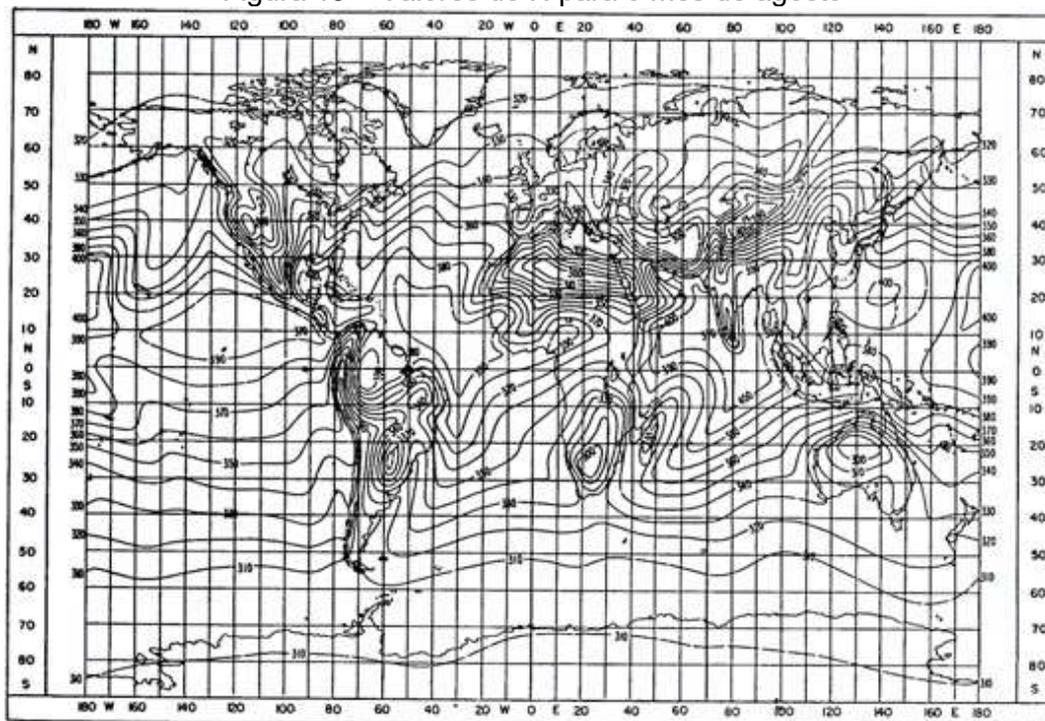
A seguir são apresentadas as Figuras 18 e 19, baseadas na recomendação ITU-R P.453-9 com os valores de unidades  $N$  para os meses de fevereiro e agosto, respectivamente, quando a variação climática para a região em estudo é maior, culminando, portanto, em maior influência na refração atmosférica.

Figura 18 – Valores de  $N$  para o mês de fevereiro



Fonte: Miyoshi e Sanches, 2008.

Figura 19 – Valores de N para o mês de agosto



Fonte: Miyoshi e Sanches, 2008.

A refratividade é um fator que afeta a cobertura em largas regiões, normalmente maiores que 50 km, a partir de uma repetidora. Para predição de sinais em áreas relativamente pequenas, o fator de refratividade tem pouca ou nenhuma influência no resultado da predição.

#### 4.3.8 *Clima*

Pode-se optar por diferentes categorias de clima, porém, de acordo com o próprio trabalho de Anita Longley e Phil Rice (RICE *et al.*, 1966), o clima temperado continental é o mais comum em zonas subtropicais e temperadas. Esse parâmetro tem pouca influência para predições menores que 100 km, porque a diferença existente entre os climas temperado continental e temperado marítimo é pequena, mas para predições maiores que 100 km a probabilidade de ocorrência de refração e fenômenos de duto em áreas marítimas aumenta consideravelmente e pode resultar em um aumento de área de cobertura por períodos de até 10% do tempo ao longo de um ano.

#### 4.3.9 *Parâmetros do Cálculo do Perfil*

Os seguintes parâmetros são utilizados pelo *software* para o cálculo do perfil de cada radial:

- a) Altura efetiva da antena;
- b) Ângulo de elevação e distâncias para horizonte de rádio;
- c) Referências de atenuação (espaço livre, difração, obstrução etc.);
- d) Potência do transmissor;
- e) Sensibilidade do receptor;
- f) Sistema irradiante (perda em cabos e conectores, perda de inserção, ganho de antena, combinadores etc.).

#### 4.3.10 *Calibração da ferramenta de predição*

Em conjunto com o desenvolvimento do modelo puramente teórico, foram realizadas algumas medidas em campo a fim de promover uma calibração/validação dos parâmetros utilizados para a região específica de interesse. Sendo assim, foram executadas predições no *software* sobre a área em que se realizaram as medidas de campo e, através da comparação de resultados, os parâmetros do *software* foram continuamente ajustados de forma que a predição se aproximasse da medida real. Quando obtido esse resultado, os parâmetros das estações-base e portáteis foram alterados para a situação desejada, possibilitando que novas predições possam ser realizadas. Utilizando esse método, a predição aumenta a precisão e fornece resultados mais próximos da condição real de campo.

#### 4.3.11 *Resultados das áreas de cobertura*

Todas as perdas foram calculadas no modo móvel, no qual o percentual para a variabilidade de situação e a variabilidade de tempo ou nível de confiança devem ser definidas.

O parâmetro de variabilidade de tempo (ou nível de confiança) refere-se às diferenças que o nível do sinal recebido experimenta com o passar do tempo no mesmo local. Oscilações no sinal ocorrem mesmo quando há fatores constantes, como potência de transmissão, antenas, topografia etc., principalmente em

decorrência de variações climáticas como mudanças lentas na refração atmosférica; assim, a variabilidade de tempo descreve os efeitos dessas alterações ao longo do tempo. Essa variabilidade é descrita como desempenho do sistema; em parte da literatura é utilizado o termo “confiança” para esse parâmetro, que pode ser definido como: ao longo do caminho especificado para pelo menos X % do tempo, o nível do sinal recebido será igual ou maior que Z dBm.

A variabilidade de situação explica as variáveis “ocultas”, ou cujos efeitos não se compreendem ou simplesmente escolhe-se não controlar. Os valores dessas variáveis estão no capricho da natureza e diferem entre o que seria fração de caminhos idênticos nos quais se espera que a intensidade real do campo recebido seja igual ou maior que a intensidade calculada/predita (HUFFORD; LONGLEY; KISSICK, 2019).

Somando-se os recursos computacionais e a disponibilidade de mapas, o produto final fornecido pelo *software* é um arquivo no formato KMZ, que pode ser lido pelo aplicativo Google Earth, permitindo visualizar de forma direta a área coberta.

#### **4.4 Setup para coleta das medidas – Louveira (SP)**

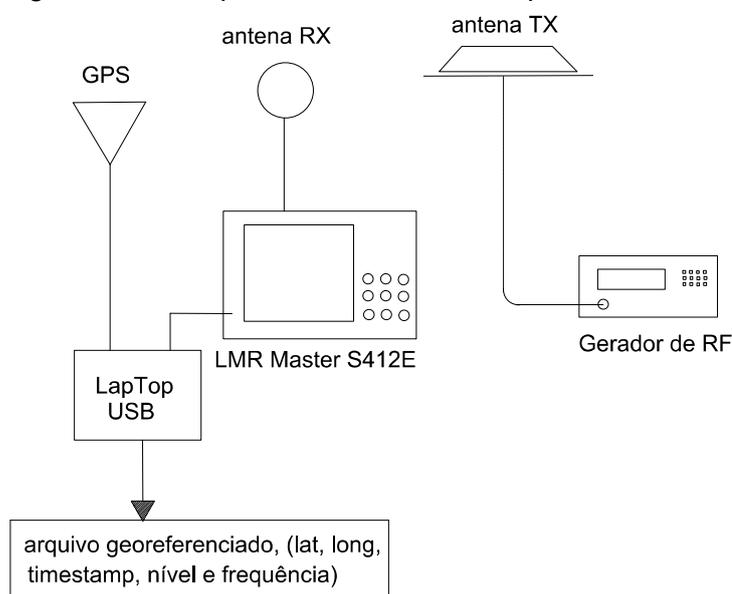
As medições foram realizadas na frequência de 915 MHz utilizando um gerador de sinal marca HP modelo 83752 (Figura 21), com 10 dBm de potência de saída e 3 metros de cabo coaxial LMR 400, conectado a uma antena ferroviária de baixo perfil com ganho unitário (0 dBi) e polarização vertical, gerando uma onda portadora (em inglês, *carrier wave* – CW). Como receptor, foi utilizado um analisador de espectro de marca Anritsu, modelo S412E (Figura 22), com 1 metro de cabo coaxial LMR 240 conectado a uma antena omnidirecional, polarizada verticalmente com ganho de 8,1 dB. Ambas as antenas, transmissora e receptora, estavam a uma altura de 1 metro do solo.

Um computador com *software* para aquisição de dados apropriado (STI, 2019) – *Field Test 7, Signal Acquisition and Analysis Software*, versão 7.45.468 – foi utilizado para coletar as medidas do analisador de espectro e a posição do GPS. O tempo de varredura no analisador de espectro foi ajustado para 500 ms e o *software* foi programado para ler três vezes o sinal, fazer a média e então gravar a intensidade do sinal e a posição geográfica. Para esse trecho, a gravação por meio

do *software* foi realizada manualmente, ou seja, deslocava-se o espectro e o laptop para a posição eleita da coleta e iniciava-se a gravação; após isso, a gravação era pausada e movia-se (caminhando) o equipamento para a nova posição; iniciava-se a gravação novamente, e assim sucessivamente em todas as medidas realizadas em Louveira.

O *software* gerou um arquivo do tipo planilha com as variáveis *timestamp*, latitude, longitude, nível e frequência. O limiar de sensibilidade de recepção foi ajustado para -115 dBm. A Figura 20 ilustra a configuração utilizada.

Figura 20 – Setup das medidas em campo em Louveira



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 21 – Instrumento Gerador de RF – HP



Fonte: Keysight, 2019.

Figura 22 – Instrumento de medidas utilizado – analisador LMR S412E



Fonte: Anritsu, 2019.

#### 4.5 Setup para coleta das medidas – Serra do Mar (SP)

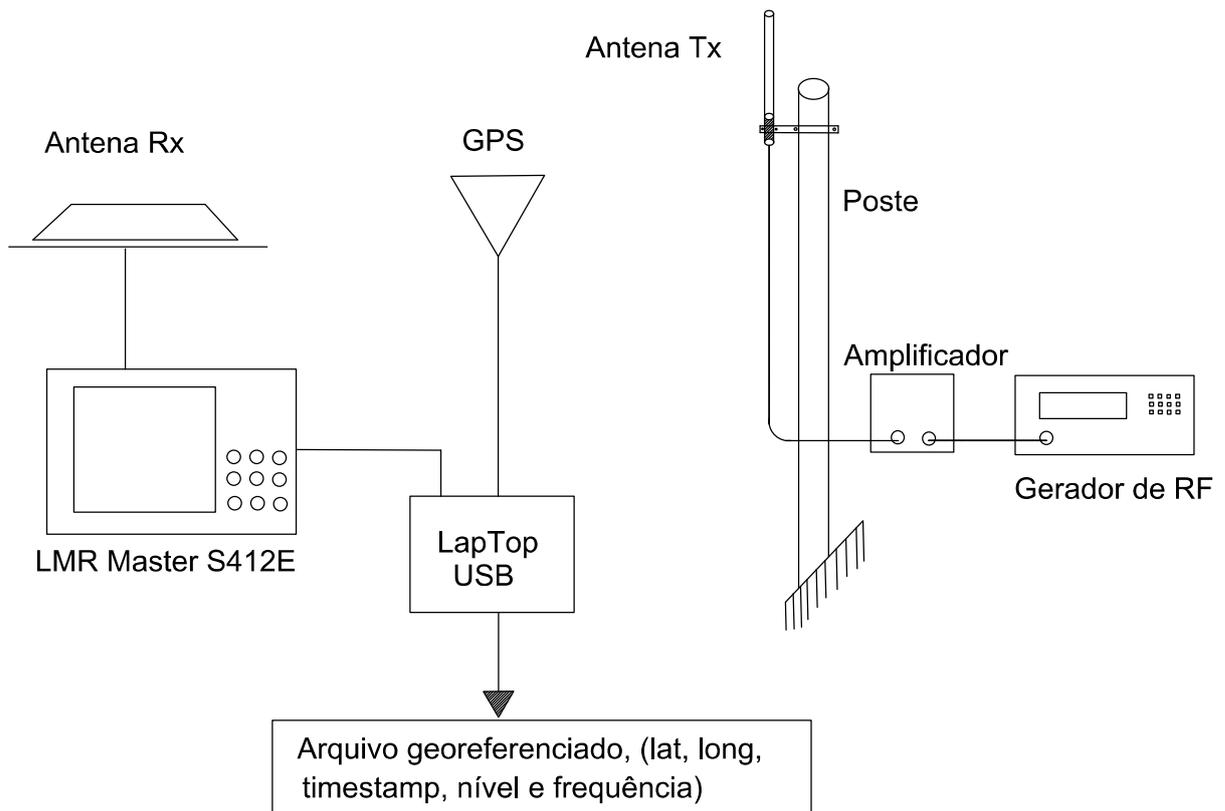
Na região da Serra do Mar existe a complexidade de realizar medidas práticas em função da necessidade de veículos apropriados (trens), bem como de autorizações da operadora ferroviária para tais medidas, uma vez que isso impacta diretamente a circulação de trens. As medidas foram realizadas na faixa de 450 MHz, para que os dados obtidos pudessem ser utilizados para avaliação de distintos sistemas de RF nessa região, mesmo que de forma extrapolada, podendo assim servir de análise para uma ampla variedade de aplicações, tais como sistemas de dados terra-trem, LTE, *Positive Train Control* etc.

Na execução dessas medidas foi utilizado um gerador de sinal (Rohde & Schwarz SMT06) conectado a um amplificador com 5 W de potência de saída e 10 metros de cabo coaxial LMR 400, conectado a uma antena omnidirecional com ganho de 8,15 dBi e polarização vertical, gerando uma onda portadora (CW). Na locomotiva foi utilizado um analisador de espectro (Anritsu S412E) com 4 metros de cabo coaxial LMR 240 conectado a uma antena de baixo perfil polarizada verticalmente com ganho unitário (0 dBd).

Da mesma forma que na coleta em Louveira, um computador com *software* de coleta de dados foi utilizado para gravar as medidas do espectro e a posição do GPS. O tempo de varredura no analisador de espectro foi ajustado para 500 ms, e o *software* de coleta foi programado para efetuar três leituras do sinal, fazer a média e gravar os dados. Então, a cada 1,5 s foram gravados no arquivo o nível médio do sinal e a posição geográfica.

O *software* gerou um arquivo do tipo planilha com as variáveis *timestamp*, latitude, longitude, nível e frequência. O limiar de sensibilidade de recepção foi ajustado para -115 dBm. A Figura 23 ilustra a configuração utilizada e a Figura 24, os instrumentos, a antena ferroviária no teto da locomotiva e o poste de transmissão com a antena omni instalada.

Figura 23 – *Setup* montado na Serra do Mar



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 24 – Equipamentos utilizados para coleta de dados na Serra do Mar



Fonte: O autor

A antena de recepção foi fixada no teto da locomotiva, ficando a 4,5 m do solo, e a antena de transmissão no poste existente ficou a 8 metros do solo.

#### 4.6 Coleta das medidas na região de Louveira (SP)

O transmissor foi instalado próximo às coordenadas  $23^{\circ}04'43.75''S$  e  $46^{\circ}56'54.35''W$ , e foram utilizados equipamentos comuns para esse tipo de atividade, como gerador de RF e analisador de espectro. O suprimento de energia elétrica do gerador de RF foi realizado através de um inversor ligado à bateria de um veículo, sendo que o analisador de espectro e o *laptop* dispunham de bateria interna.

A Figura 25 apresenta o local escolhido para a instalação do transmissor.

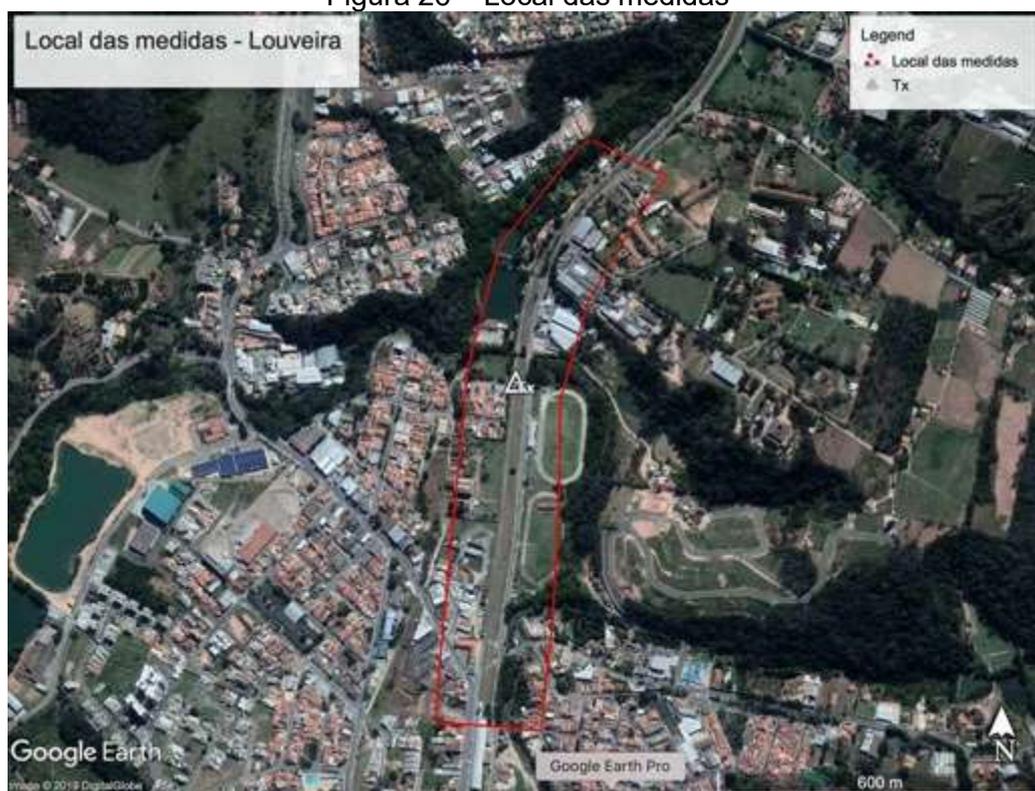
Figura 25 – Local do gerador de RF



Fonte: O autor

A área das medidas é apresentada na Figura 26, com o transmissor locado nas coordenadas: latitude  $23^{\circ} 4'43,75''\text{S}$  e longitude  $46^{\circ}56'54,35''\text{W}$ .

Figura 26 – Local das medidas



Fonte: O autor

O Quadro 4 é apenas uma amostra do resultado da coleta, uma vez que houve a coleta de mais de 80 pontos. O Anexo D apresenta a planilha completa, contendo todos os pontos da coleta.

Quadro 4 – Amostra da planilha de medidas gerada pelo *software* de aquisição de dados

ID	Latitude	Longitude	Intensidade do sinal (dBm)
20	-23.07623	-46.94765	-100
19	-23.07633	-46.94772	-86.4
18	-23.07644	-46.94778	-82.8
17	-23.07655	-46.94785	-79.3
16	-23.07665	-46.94791	-78.5
15	-23.07677	-46.94796	-79.4

Fonte: Elaborado pelo autor

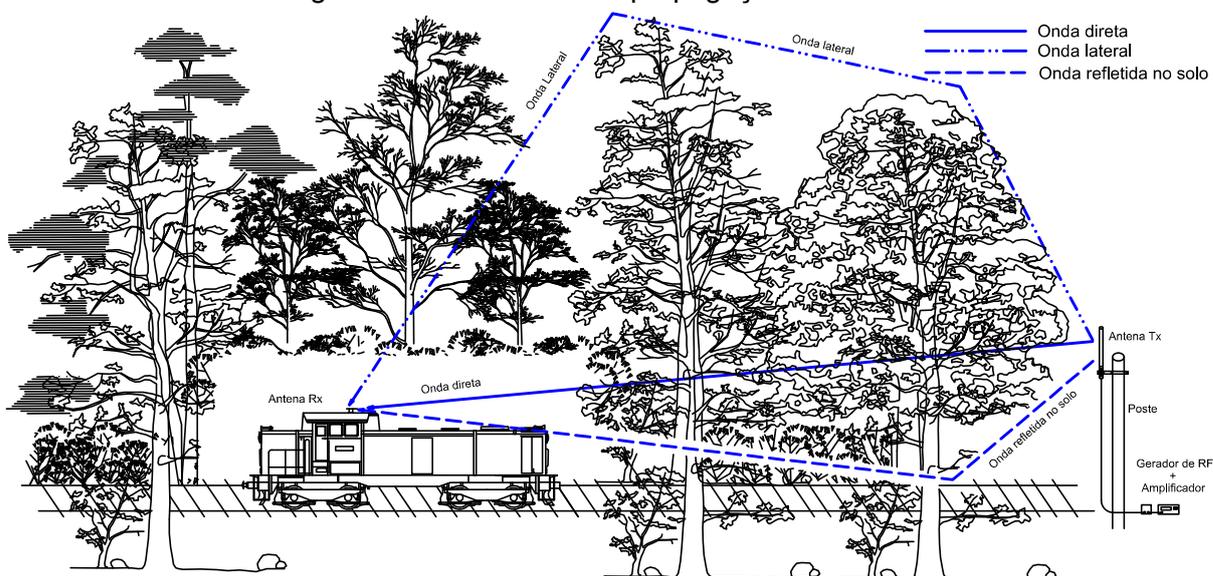
#### 4.7 Coleta das medidas na região da Serra do Mar (SP)

A ferrovia na região da Serra do Mar, no estado de São Paulo, atravessa a Mata Atlântica, que é uma floresta caracterizada por grande variedade de espécies, organismos denso com copas contíguas, ambiente interno denso, quente e úmido.

A propagação de ondas de rádio nas ferrovias que atravessam florestas é ditada pela composição de vários fenômenos, como a atenuação e o espalhamento do sinal na vegetação ao redor dos corredores ferroviários, bem como pela atenuação do espaço livre em alguns casos. Além disso, o ambiente apresenta alguns obstáculos naturais para o trajeto da ferrovia que devem ser evitados, e isso requer várias curvas para reorientar a direção dos trilhos, geralmente causando obstrução dos sinais de rádio por vegetação densa ao redor do corredor.

A propagação de ondas nesse ambiente ocorre de três maneiras distintas: a onda direta, a onda refletida no solo e a onda lateral, conforme mostrado na Figura 27.

Figura 27 – Geometria da propagação das ondas

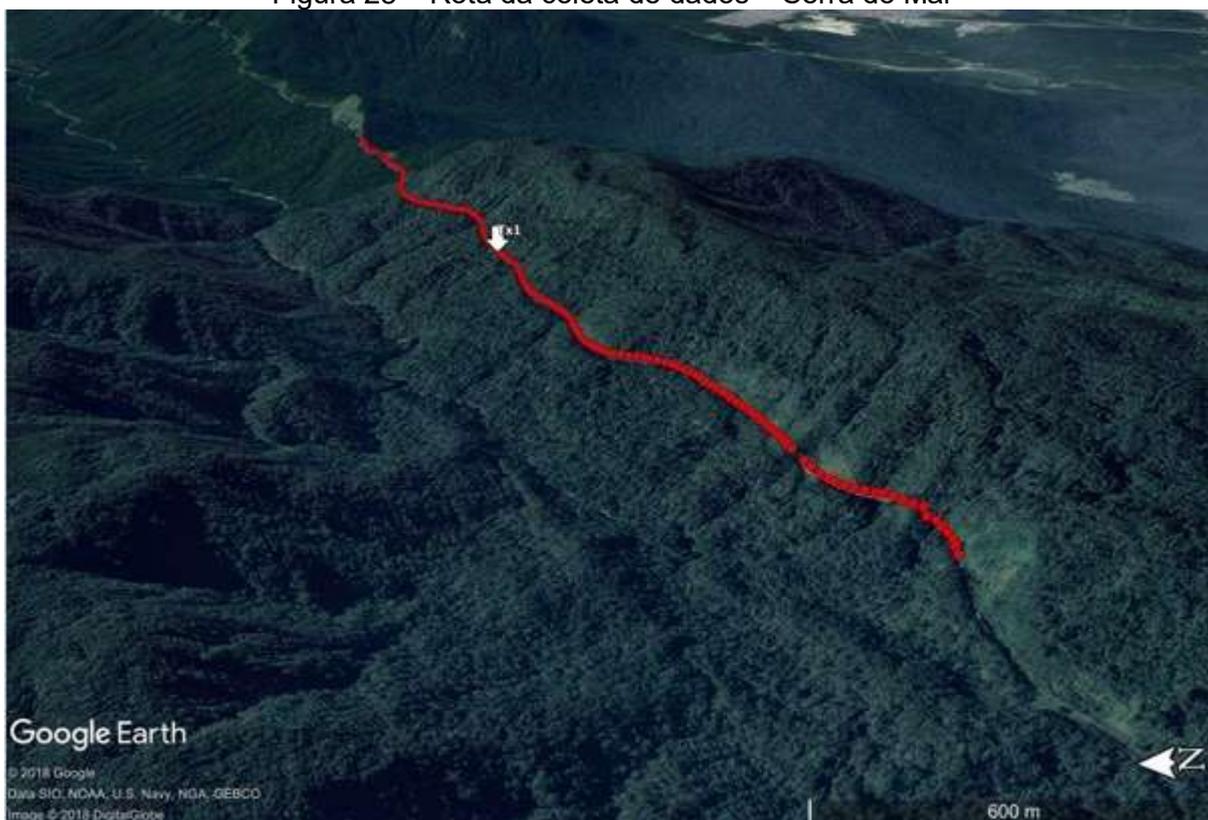


Fonte: Elaborado pelo autor

A onda direta ocorre sem obstrução em trechos curtos dentro do corredor, quando não há curvas ou vegetação entre a antena no trem e a antena na estação transmissora. Isso também ocorre de forma difratada devido ao perfil do solo em alguns casos e à forma dispersa através da vegetação. A onda reflete no solo em alguns casos, quando a onda reflete na terra nua e atinge o receptor, sendo isso raro nesse ambiente. Por outro lado, a onda lateral ou de superfície é a que percorre toda a vegetação, sendo regularmente percebida nesse cenário, principalmente nos locais onde existe uma parte do corredor com maior largura sem vegetação e, conseqüentemente, maior abertura para o céu.

A região de teste é apresentada na Figura 28; o terreno é montanhoso e coberto por densa floresta nativa. A locomotiva usada para essas medições viajou a velocidades que variaram de 20 a 35 km/h. O transmissor foi instalado nas coordenadas Lat 23°57'20.20"S, Long 46°29'29.40"W e altitude de 165 m com relação ao nível médio do mar.

Figura 28 – Rota da coleta de dados – Serra do Mar



Fonte: O autor

A coleta do sinal começou nas coordenadas 23°58'17,59"S, 46°34'46,14" W e terminou nas coordenadas 23°57'8,59 "S, 46°32'22,94" W, em uma rota aproximada de 3.500 metros, conforme apresentado na Figura 28.

Devido à grande quantidade de pontos coletados, o quadro contendo essas informações é apresentado no Anexo D.

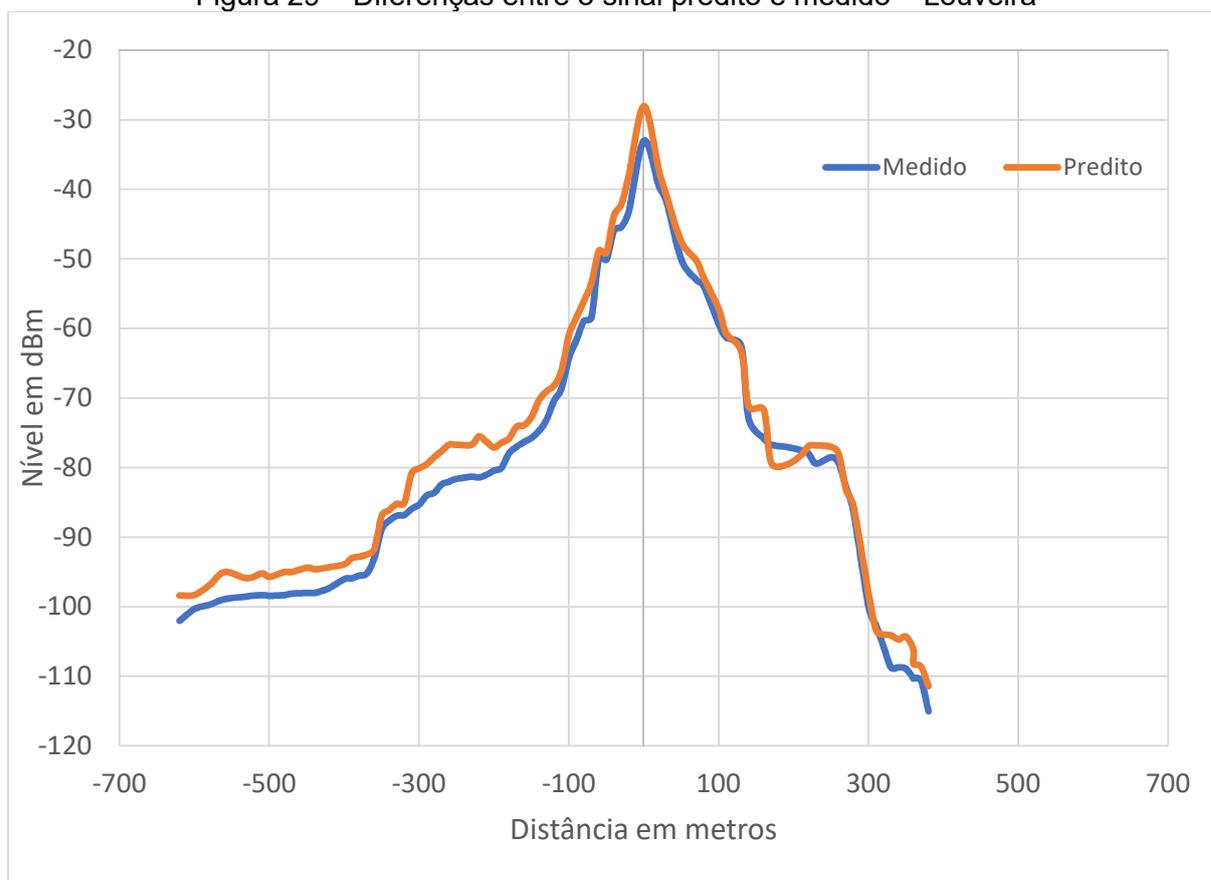
## 4.8 Comparação das medidas de campo com o valor predito no *software* após calibração

### 4.8.1 Louveira

A região de Louveira apresenta um perfil topográfico plano, com pouca e esparsa vegetação na direção norte e, na direção sul, totalmente livre de qualquer obstrução.

Após ajustes dos parâmetros utilizados no *software*, chegou-se ao resultado apresentado na Figura 29, que compara o valor medido e o predito, mostrando que para essa região, após todas as calibrações, a ferramenta de predição apresenta um erro médio de 2,7 dB, com um desvio padrão de 1,7 dB e diferença máxima de 5.9 dB entre o nível medido e o previsto.

Figura 29 – Diferenças entre o sinal predito e medido – Louveira



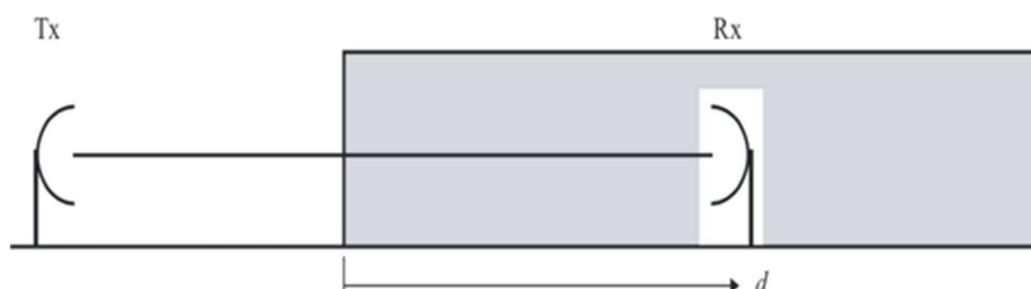
Fonte: Elaborado pelo autor

A distância 0 na Figura 29 indica a localização do transmissor.

#### 4.8.2 Serra do Mar

A região da Serra do Mar apresenta vegetação densa, que obstrui o sinal. Logo, nesse cenário deve ser acrescentada a perda para a correta caracterização do ambiente de propagação. Assim, foram calculadas e inseridas na predição as perdas decorrentes da obstrução por vegetação, utilizando a recomendação P.833 do ITU-R (ITU, 2016b), que é aplicada quando o transmissor está fora da vegetação e o móvel dentro da vegetação, como ilustrado na Figura 30. No ambiente de teste, as características de estação de transmissão e do móvel são similares a esse modelo.

Figura 30 – Perfil representativo dentro da vegetação



Fonte: Modificado de ITU, 2016b

De acordo com essa recomendação, quando um terminal está localizado dentro da floresta ou de vegetação extensa a perda adicional devido à vegetação pode ser caracterizada com base em dois parâmetros:

- a) A atenuação específica (dB/m) devido principalmente ao espalhamento de energia para fora do trajeto do sinal;
- b) A atenuação adicional total máxima (dB) devido à vegetação em um trajeto de rádio limitado pelo efeito de outros mecanismos, incluindo a propagação de ondas de superfície sobre o topo da vegetação e a dispersão para a frente no mesmo eixo do trajeto do sinal.

A máxima atenuação,  $A_{ev}$ , devido à presença de vegetação é dada por:

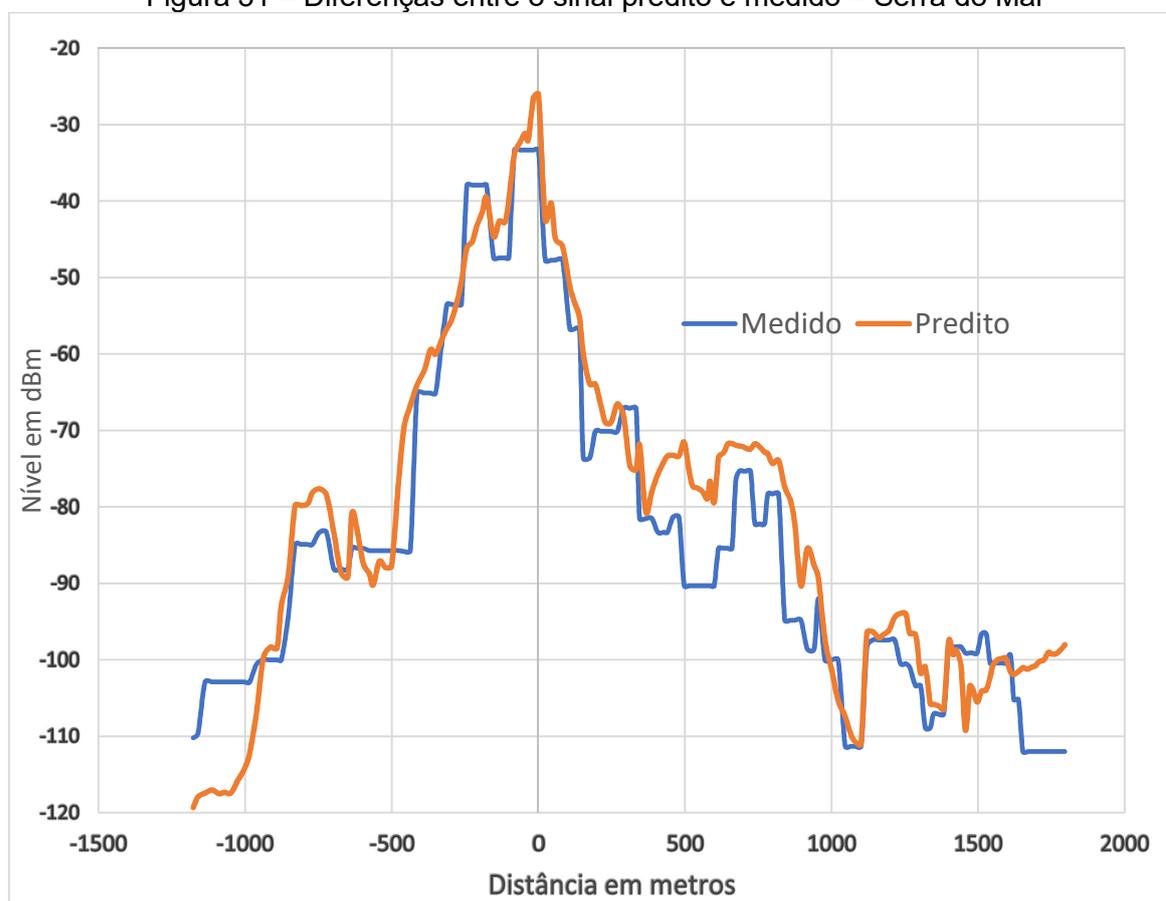
$$A_{ev} = A_m [ 1 - \exp (- d \gamma / A_m) ]$$

Na expressão,  $d$  é o comprimento do trajeto dentro da vegetação (m),  $\gamma$  é a atenuação específica para trajetos muito curtos dentro da vegetação (dB/m) e  $A_m$  é a máxima atenuação para um terminal dentro de um tipo específico e uma profundidade de vegetação (dB). Na frequência de 450 MHz, a recomendação

P.833-9 atribui uma atenuação específica para  $\gamma$  de 0,13 dB/m e o valor recomendado de  $A_m$  é de 18 dB. Já para a frequência de 915 MHz, a recomendação atribui uma atenuação específica para  $\gamma$  de 0,17 dB/m e o valor recomendado de  $A_m$  é de 26,5 dB.

Logo, na elaboração das previsões da Serra do Mar foi acrescentado o valor correspondente à perda por vegetação. Após ajustes dos parâmetros utilizados no *software*, chegou-se ao resultado da Figura 31, que apresenta as diferenças entre o valor medido e o predito, já incluindo a perda por vegetação, mostrando que para essa região, após todas as calibrações, a ferramenta de previsão apresenta um erro médio de 2,4 dB com um desvio-padrão de 8,1 dB, e a diferença máxima encontrada foi de 18 dB entre o nível medido e o previsto. Após dos pontos que mostraram diferenças maiores que 10 dB, identificou-se que a vegetação nesses locais obstrui o sinal da antena receptora, mesmo na parte superior, formando um “túnel” de vegetação.

Figura 31 – Diferenças entre o sinal predito e medido – Serra do Mar



Fonte: Elaborado pelo autor

A distância 0 na Figura 31 indica a localização do transmissor.

Aplicando o Zteste para os dados do anexo D, comparando as medidas coletadas em campo e o valor predito no software após calibração, para a região de Louveira (figura 30), e para a região da Serra do Mar (figura 31), observa-se que, o Z representa adequadamente as curvas preditas para ambas regiões. O Zteste é dado por:

$$z = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}$$

Onde:  $\bar{x}_1$  e  $\bar{x}_2$  são as médias das duas amostras,  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  são os desvios padrão das duas populações e  $n_1$  e  $n_2$  são os tamanhos das duas amostras.

Os resultados do Zteste, estão apresentados para ambas regiões (Louveira e Serra do Mar) ao final do anexo D.

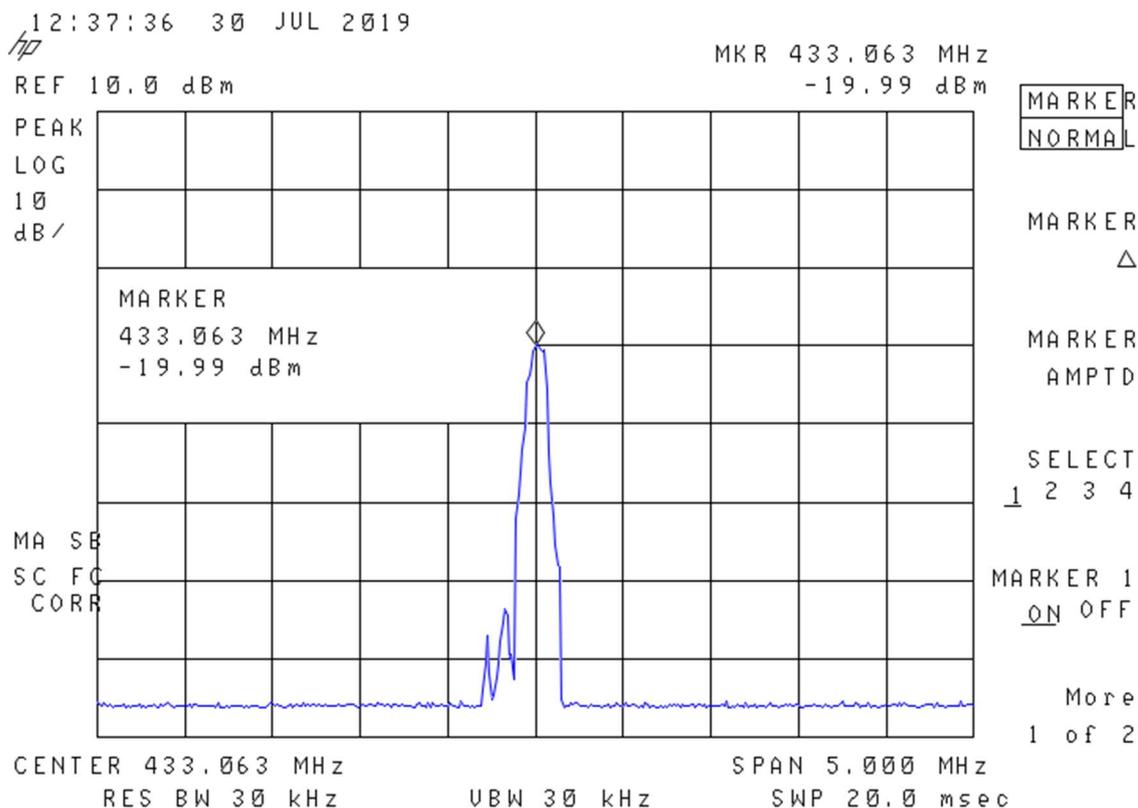
#### 4.9 Protótipos com Arduino

A fim de validar o sistema proposto, foram montados dois protótipos dos transmissores em *protoboard* usando um Arduino tipo Nano em conjunto com módulos de RF LoRA operando em 433 MHz e em 915 MHz, nos quais o Tx envia um sinal constante e o Rx, ao receber esse sinal, apresenta o nível de RSSI no *display*, acendendo os LEDs em função do nível de recepção; à medida que a intensidade do sinal aumenta (o veículo ferroviário se aproxima), mais LEDs são acesos. São três LEDs: o primeiro está programado para acender com -120 dBm, o segundo, com -90 dBm e o terceiro, com -70 dBm.

Para o protótipo em 433 MHz foi utilizado o módulo de RF LoRa Ra-01 Ai-Thinker, que possui potência de saída de até 18 dBm e sensibilidade de recepção observada de -110 dBm. Para cumprir com as exigências da ANATEL, que, por meio

do Ato nº 14.448 de dezembro de 2017, item 4.1.5 (Anexo A), estabelece que sistemas que operam na faixa de 433 a 435 MHz devem ter sua potência EIRP limitada a 10 mW (10 dBm), foi realizada medida da potência do transmissor para garantir o atendimento à norma, conforme mostra a Figura 32.

Figura 32 – Resultado da medida de potência de saída do protótipo de 433 MHz



Fonte: Analisador de espectro HP

Como é possível definir via *software* o valor da potência de saída, ele foi ajustado para 10 dBm e, com o uso do analisador de espectro e um atenuador de 30 dB na sua entrada, a medida foi realizada conforme apresentado na Figura 32. O resultado foi de 19,99 dB, confirmando o valor de potência de saída.

Para o sistema em 915 MHz, foi utilizado o módulo de RF LoRa modelo 2AD66-LORAV2, que apresentou uma sensibilidade de -120 dBm e potência de transmissão máxima de 20 dBm. Como a norma da ANATEL (Ato nº 14.448 de dezembro de 2017, item 10.3.2, no Anexo A) permite que a potência nessa faixa de frequência seja de até 1 watt (30 dBm), foi utilizado um amplificador modelo PHA-202-D+ na saída do módulo LoRa para elevar a potência até o máximo permitido.

Para garantir esse atendimento, foi utilizado um analisador de espectro para medir a saída do amplificador. Como esse equipamento é sensível, à potência foi

adicionado um atenuador de 30 dB na entrada do instrumento, de forma a garantir que não haveria danos a ele. A Figura 33 mostra o resultado dessa medida.

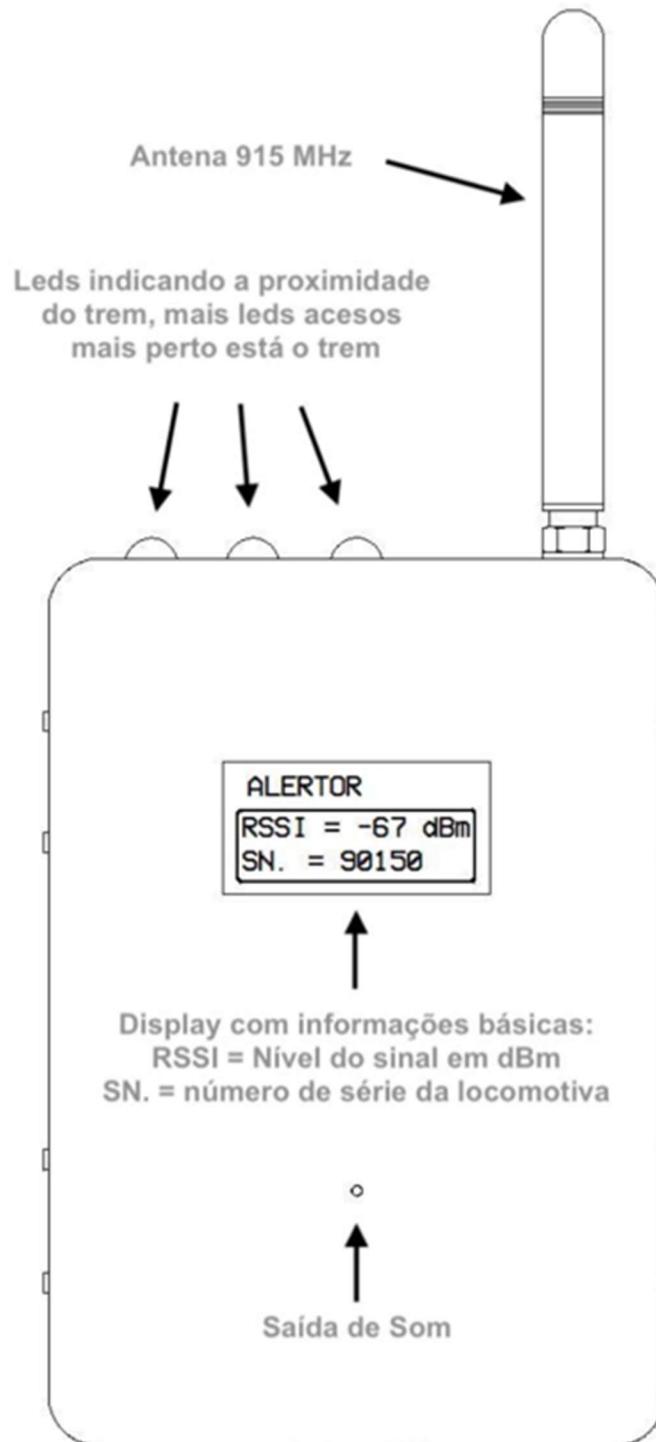


Fonte: Analisador de espectro HP

Pelo apresentado na Figura 33, pode-se observar que o nível medido está mais alto que o permitido em 0,25 dBm, pois, como há um atenuador de 30 dB na entrada do analisador de espectro, o valor medido deveria ser igual ou menor que zero para o atendimento à norma. Porém, como não há possibilidade de ajustes no amplificador e, em termos de efeitos práticos, essa diferença é pequena a ponto de não causar qualquer alteração no resultado das medidas de campo, foi considerado que o conjunto transmissor (TX LoRa + amplificador) atende à norma.

Ambos os protótipos foram utilizados na região de Louveira a fim de validar as medidas previstas pelo *software*, conforme apresentado no item 5.3.

Figura 34 – Protótipo com Arduino



Fonte: Elaborado pelo autor

O desenho da Figura 34, representa o protótipo do receptor indicando os principais elementos, sendo que os detalhes e diagramas são expostos no anexo B. O receptor foi montado em um circuito dentro de caixa específica para evitar a possibilidade de eventual falha durante os testes e o transmissor ficou montado no *protoboard*.

## 5 RESULTADOS

Todas as simulações e os testes de campo foram executados atendendo a regulamentação em vigor, e os resultados mostraram que o uso da faixa de 915 MHz teve um alcance dentro das recomendações de segurança. Porém, para a faixa de frequência de 433 MHz, o resultado na Serra do Mar mostrou que, em uma condição de obstrução muito intensa e com o receptor junto ao corpo do usuário, causando uma atenuação adicional (atenuação corporal) da ordem de 14 dB, as recomendações de margem de segurança para o tipo de alerta não foram alcançadas com o uso desse módulo de RF.

Mesmo com a predição de cobertura mostrando diferenças de mais de 5 dB na região de Louveira e de até 18 dB na Serra do Mar, verificou-se que essas diferenças ocorreram em distâncias mais afastadas do transmissor. Já nas regiões de interesse de funcionamento do sistema, que variam de 200 a 400 metros do transmissor, as diferenças são menores, chegando a 2,5 dB, significando um reduzido impacto nos resultados das simulações quando comparadas ao mundo real.

### 5.1 Área de cobertura calibrada – Louveira

Foram realizadas duas áreas de cobertura para cada faixa de frequência (433 e 915 MHz), uma considerando a propagação sem influência da atenuação corporal e outra com a ação desse efeito, que promove uma redução do nível médio recebido pelo receptor quando o corpo do usuário está posicionado entre o sinal vindo do transmissor e o receptor, conforme apresentado no item 2.9.

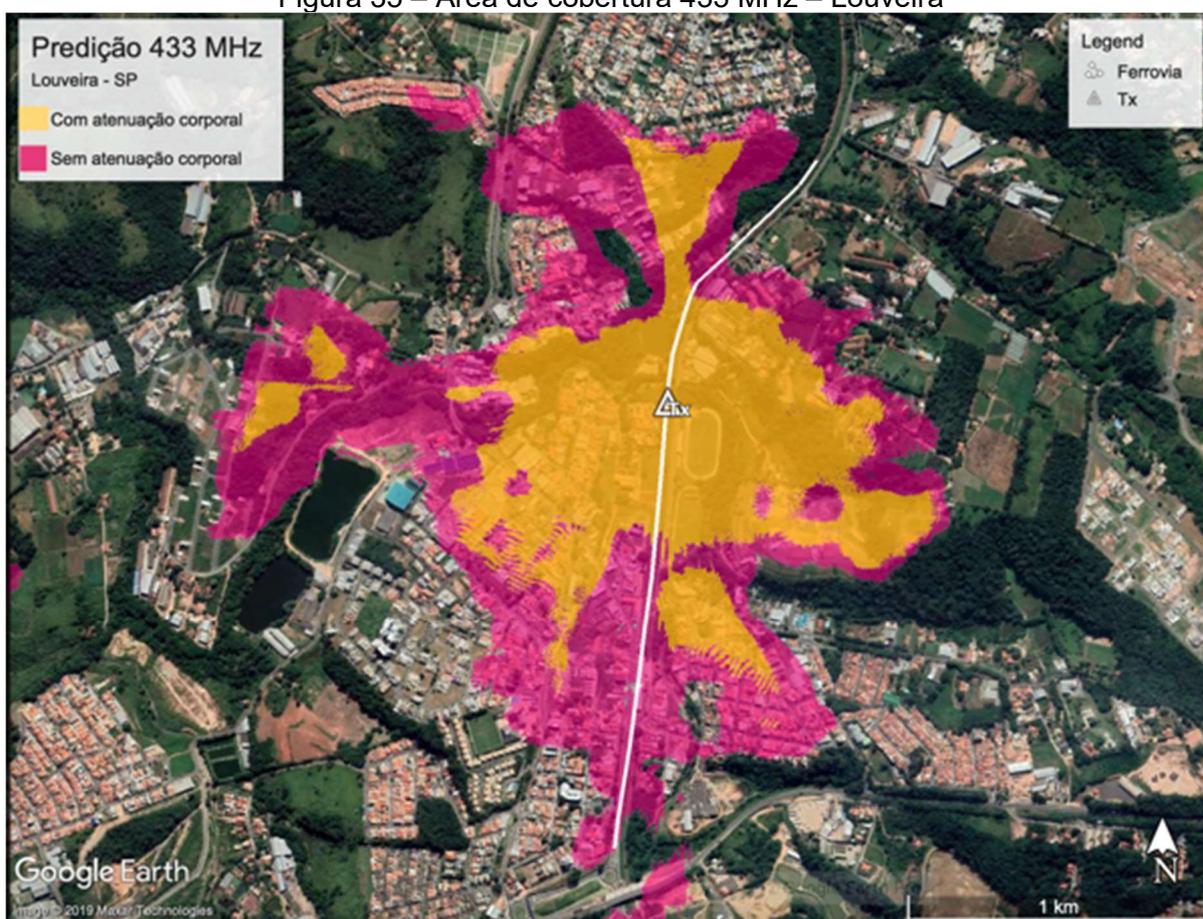
Os Quadros 5 e 6 apresentam os valores utilizados para predição das áreas de cobertura, sendo que o limite de sensibilidade foi estabelecido em -110 dBm para 433 MHz e -120 dBm para 915 MHz, em função dos valores encontrados no módulo de RF LoRa para cada frequência.

Quadro 5 – Parâmetros da predição de cobertura – Louveira em 433 MHz

Parâmetro	Valor
Potência de TX	10 mW (10 dBm)
Limiar de recepção	-110 dBm
Ganho de antena TX	0 dBd (ganho unitário)
Ganho de antena RX	0 dBd (ganho unitário)
Perda nos cabos e conectores	0 dB
Altura do Tx	0,8 metro
Altura do móvel	1 metro
Refratividade	301 N
Condutividade do solo	0.005 S/m
Permissividade relativa do solo	15
Clima	Continental subtropical
Polarização	Vertical
Nível de confiança	95%
Variabilidade da situação	50%
Atenuação corporal (quando aplicável)	14 dB

Fonte: Elaborado pelo autor

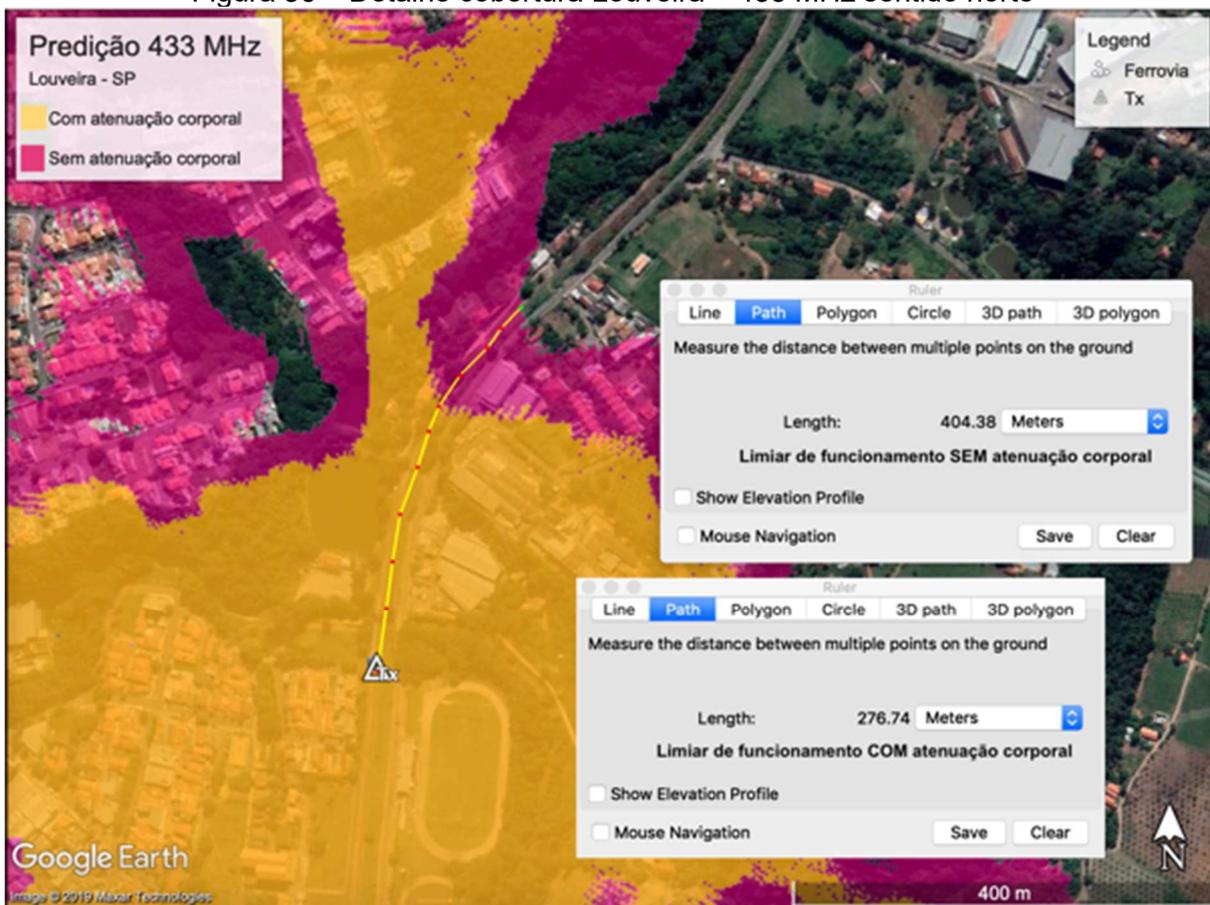
Figura 35 – Área de cobertura 433 MHz – Louveira



Fonte: O autor

A Figura 35 apresenta a área de cobertura total predita para a faixa de 433 MHz no trecho ferroviário de Louveira, destacando em cores diferentes a ausência de atenuação corporal e a presença de atenuação, que para a faixa de frequência de 433 MHz é de 14 dB.

Figura 36 – Detalhe cobertura Louveira – 433 MHz sentido norte

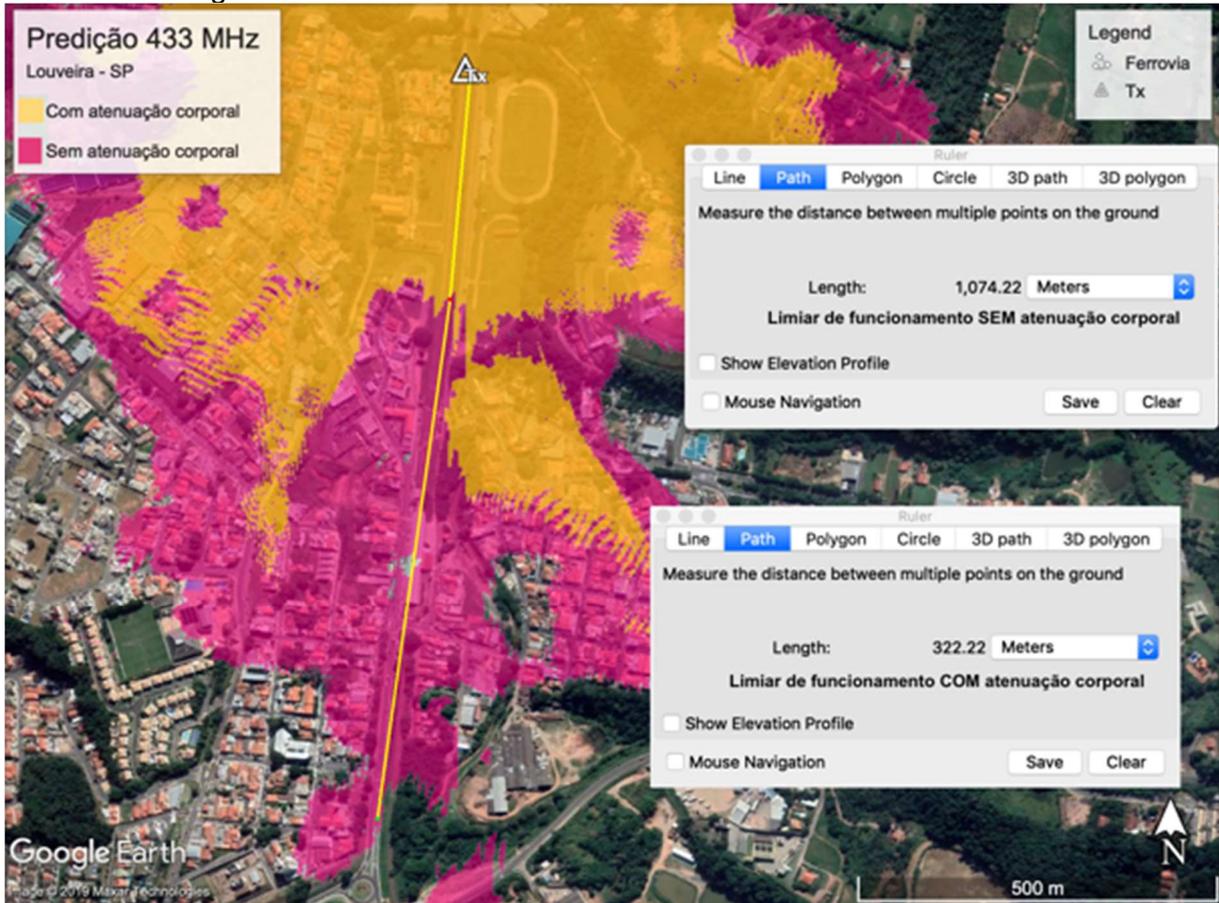


Fonte: O autor

A Figura 36 mostra que a distância alcançada para a faixa de 433 MHz no sentido norte de Louveira sem o efeito da atenuação corporal foi de 404,38 metros; ao aplicar essa atenuação, a distância máxima foi de 276,74 metros.

A Figura 37 mostra que a distância alcançada para a faixa de 433 MHz no sentido sul de Louveira sem o efeito da atenuação corporal foi de 1.074 metros e que, ao aplicar essa atenuação, a distância máxima foi de 322,22 metros.

Figura 37 – Detalhe da cobertura Louveira – 433 MHz sentido sul



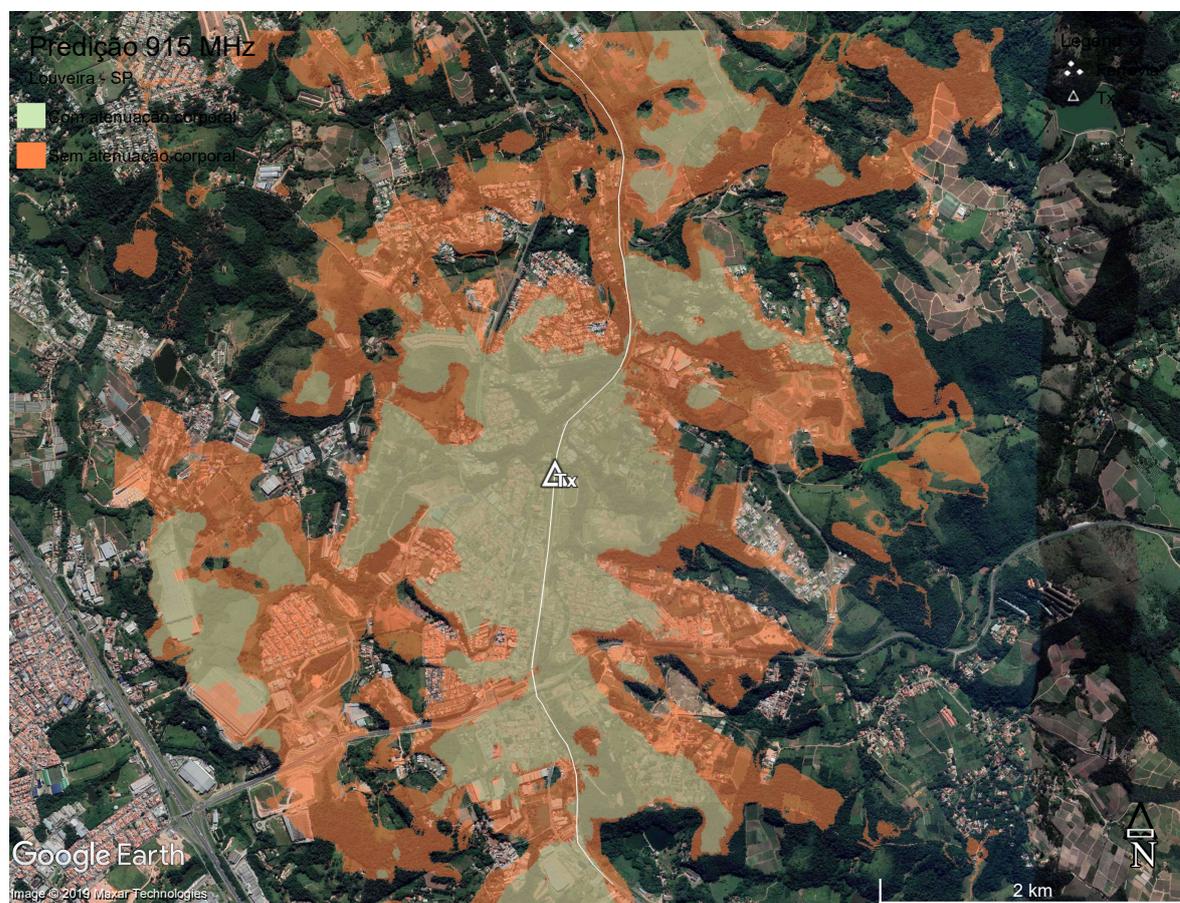
Fonte: O autor

Quadro 6 – Parâmetros da predição de cobertura – Louveira em 915 MHz

Parâmetro	Valor
Potência de TX	1 W (30 dBm)
Limiar de recepção	-120 dBm
Ganho de antena TX	5 dBi
Ganho de antena RX	0 dBd (ganho unitário)
Perda nos cabos e conectores	0.5 dB
Altura do Tx	1,6 metro
Altura do móvel	1 metro
Refratividade	301 N
Condutividade do solo	0.005 S/m
Permissividade relativa do solo	15
Clima	Continental subtropical
Polarização	Vertical
Nível de confiança	95%
Variabilidade da situação	50%
Atenuação corporal (quando aplicável)	15.5 dB

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 38 – Área de cobertura 915 MHz – Louveira

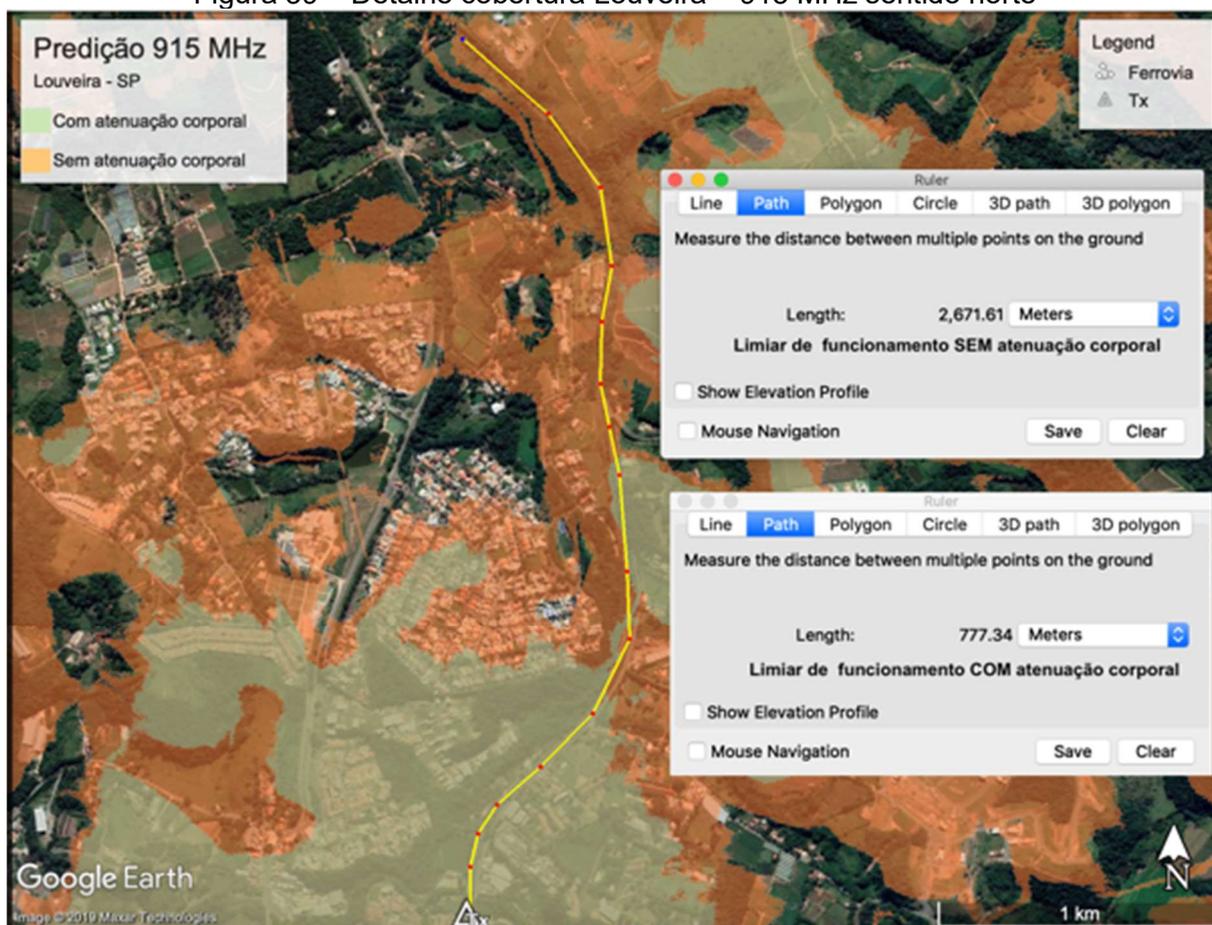


Fonte: O autor

A predição para a faixa de 915 MHz, no trecho ferroviário de Louveira, apresentou uma área de cobertura maior que a de 433 MHz, pois, mesmo sendo maior a perda por propagação no espaço livre para faixas de frequências mais altas, outros três fatores foram predominantes nessa situação:

- a) Potência de transmissão permitida pela norma ANATEL 20 dB maior que na faixa de 433 MHz;
- b) Uso de antena com ganho de 5 dBi, também permitida pela norma ANATEL;
- c) Sensibilidade do módulo de RF LoRA 10 dB melhor que na faixa de 433 MHz.

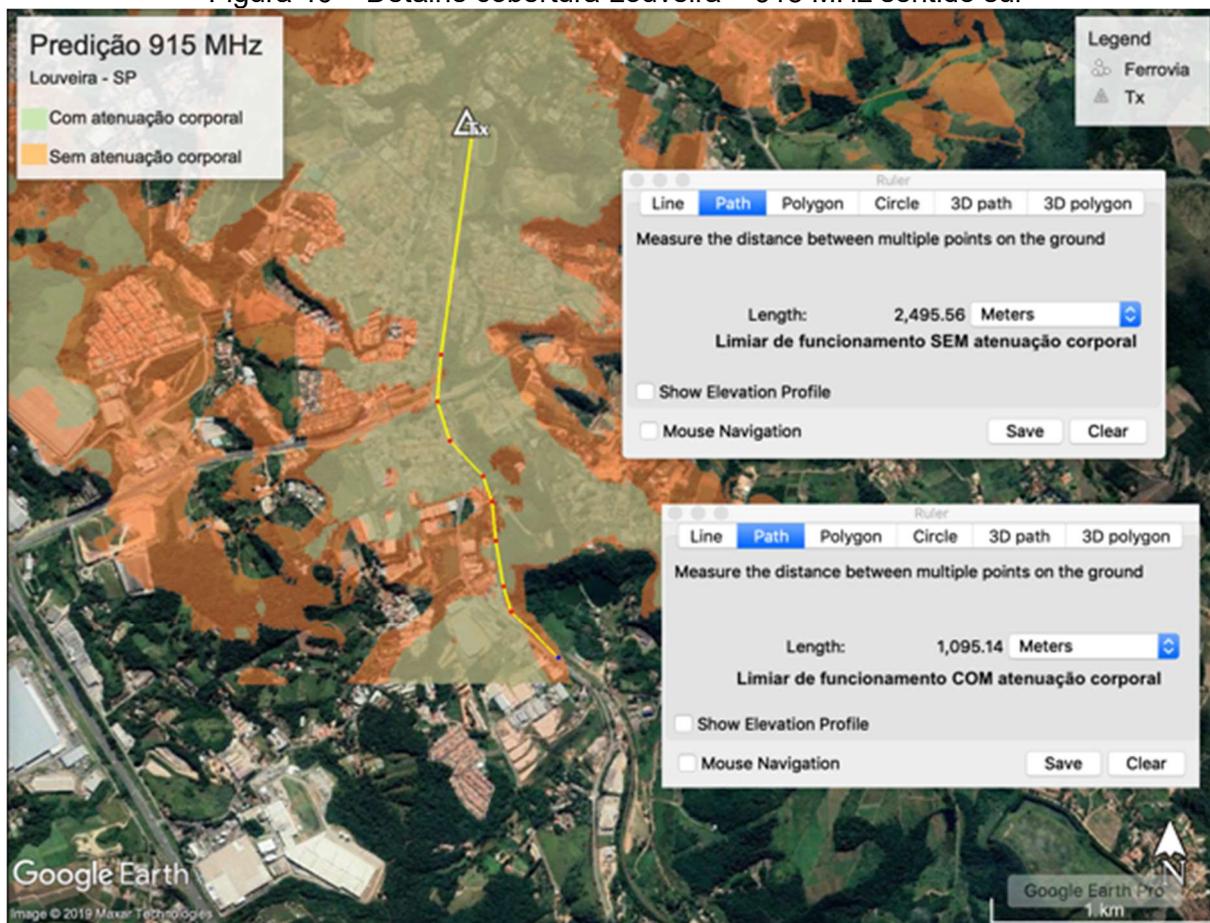
Figura 39 – Detalhe cobertura Louveira – 915 MHz sentido norte



Fonte: O autor

A Figura 39 mostra que a distância alcançada para a faixa de 915 MHz no sentido norte de Louveira sem o efeito da atenuação corporal foi de 2.671 metros e que, ao aplicar essa atenuação, a distância máxima foi de 777,34 metros.

Figura 40 – Detalhe cobertura Louveira – 915 MHz sentido sul



Fonte: O autor

A Figura 40 mostra que a distância alcançada para a faixa de 915 MHz no sentido norte de Louveira sem o efeito da atenuação corporal foi de 2.495 metros e que, ao aplicar essa atenuação, a distância máxima foi de 1.095 metros.

## 5.2 Área de cobertura calibrada – Serra do Mar

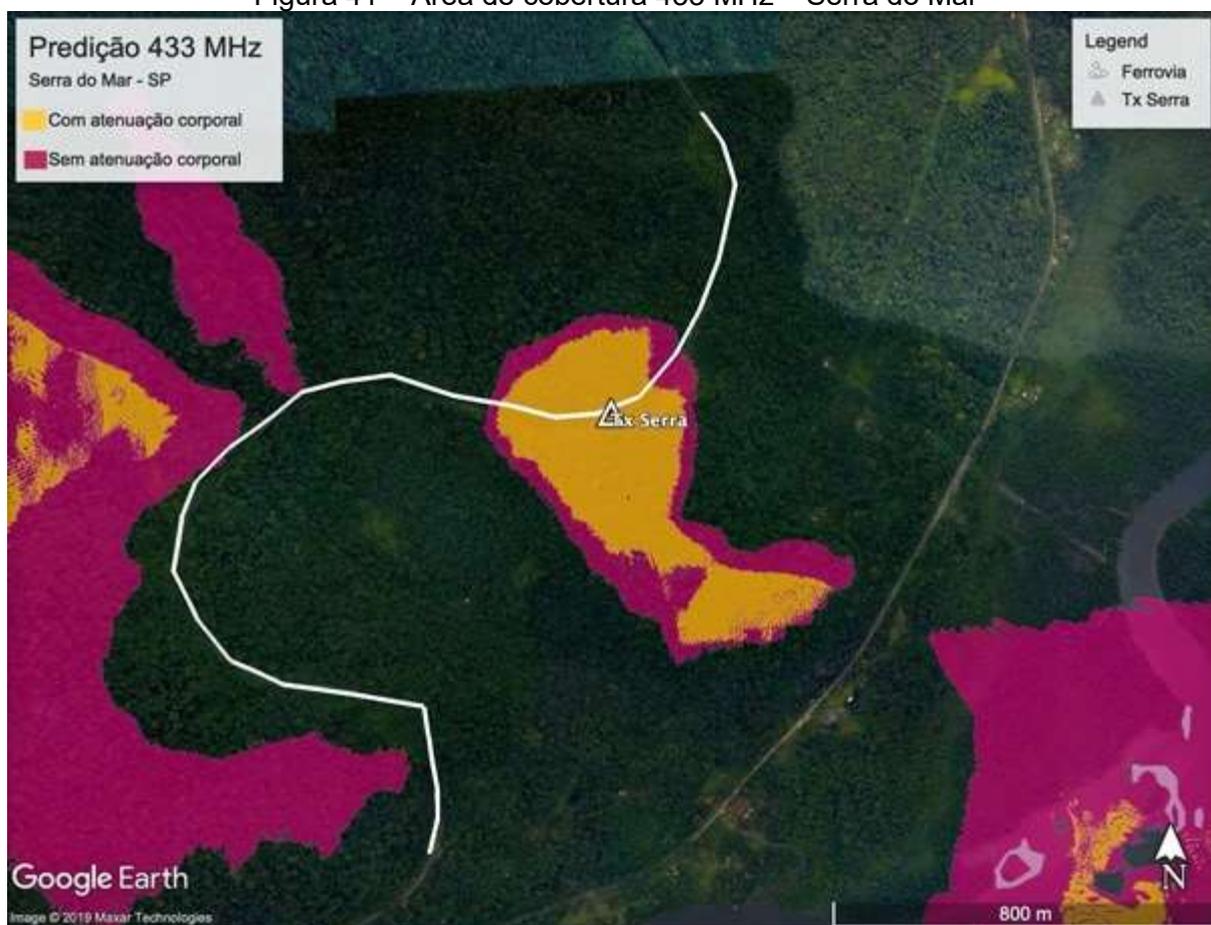
As predições de cobertura foram realizadas para as faixas de frequência de 433 e 915 MHz, utilizando os parâmetros apresentados nos Quadros 7 e 8. Os valores utilizados pelo *software* foram ajustados para a faixa de 450 MHz, que foi medida em campo, e mantidos para as faixas de 433 e 915 MHz. Para ambos os casos foi adicionada a perda por vegetação, seguindo a recomendação P.833-9 do ITU-R. Os resultados são apresentados nas Figuras 41 e 42.

Quadro 7 – Parâmetros da predição de cobertura – Serra do Mar – 433 MHz

Parâmetro	Valor
Potência de TX	10 mW (10 dBm)
Limiar de recepção	-110 dBm
Ganho de antena TX	0 dBd (ganho unitário)
Ganho de antena RX	0 dBd (ganho unitário)
Perda nos cabos e conectores	0 dB
Altura do Tx	4 metros
Altura do móvel	1 metro
Refratividade	301 N
Condutividade do solo	0.005 S/m
Permissividade relativa do solo	15
Clima	Continental subtropical
Polarização	Vertical
Nível de confiança	95%
Variabilidade da situação	50%
Atenuação corporal (quando aplicável)	14 dB

Fonte: Elaborado pelo autor

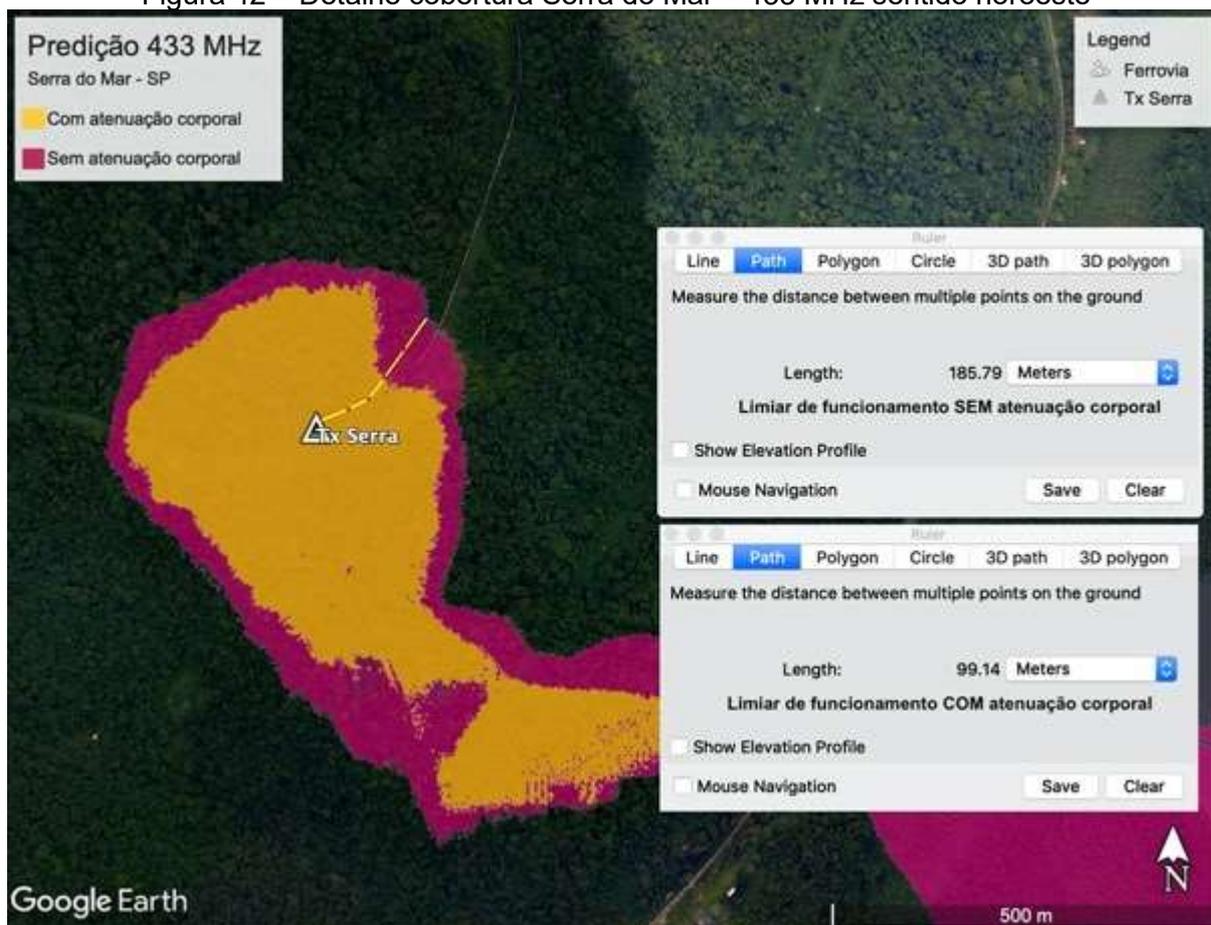
Figura 41 – Área de cobertura 433 MHz – Serra do Mar



Fonte: O autor

A Figura 41 apresenta a área de cobertura total prevista para a faixa de 433 MHz no trecho ferroviário da Serra do Mar, destacando em cores diferentes a ausência de atenuação corporal e a presença de atenuação, que para a faixa de frequência de 433 MHz é de 14 dB.

Figura 42 – Detalhe cobertura Serra do Mar – 433 MHz sentido noroeste

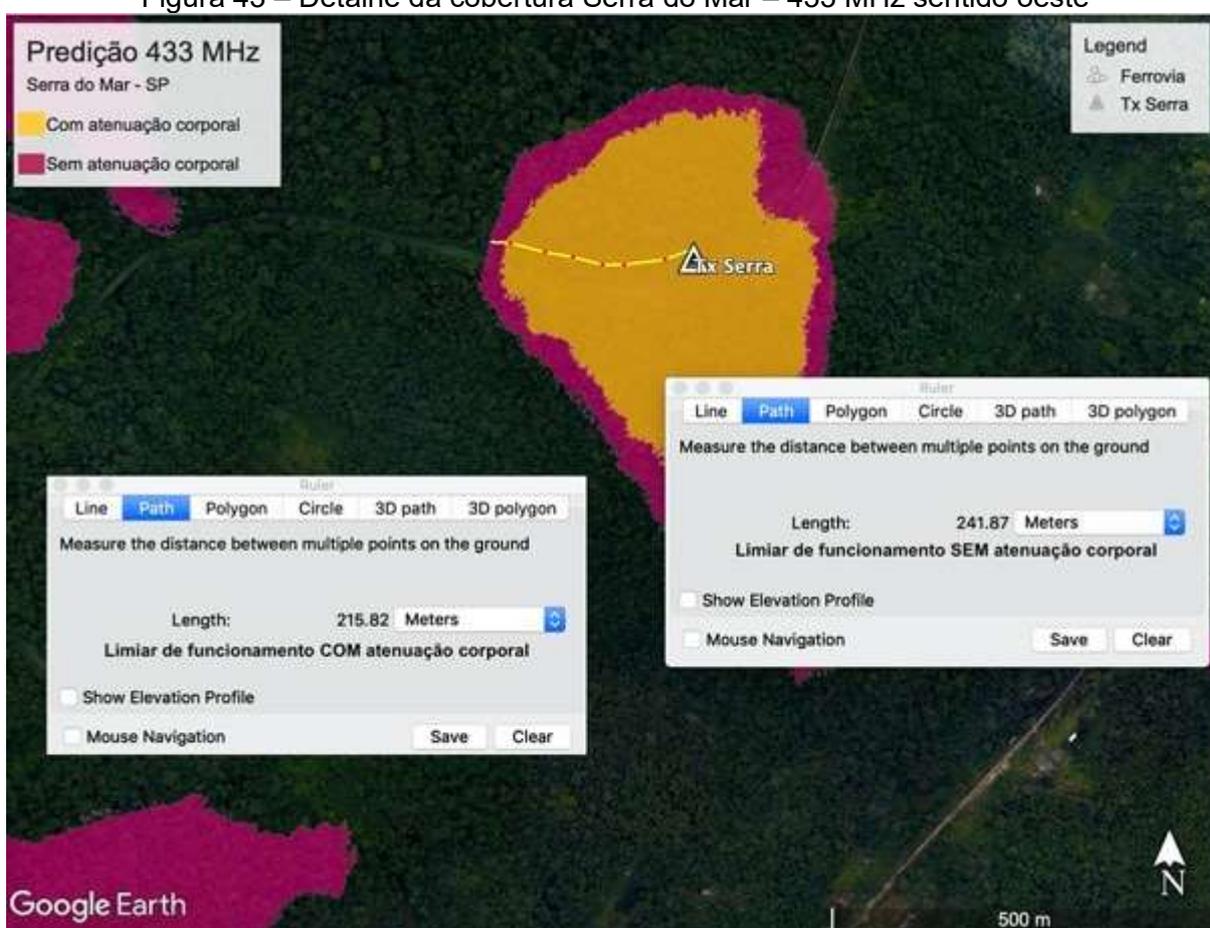


Fonte: O autor

A Figura 42 mostra que a distância alcançada para a faixa de 433 MHz no sentido noroeste da estação na Serra do Mar sem o efeito da atenuação corporal foi de 185,79 metros e que, ao aplicar essa atenuação, a distância máxima foi de 99,14 metros.

A Figura 43 mostra que a distância alcançada para a faixa de 433 MHz no sentido oeste da estação na Serra do Mar sem o efeito da atenuação corporal foi de 241,87 metros e que, ao aplicar essa atenuação, a distância máxima foi de 215,82 metros.

Figura 43 – Detalhe da cobertura Serra do Mar – 433 MHz sentido oeste



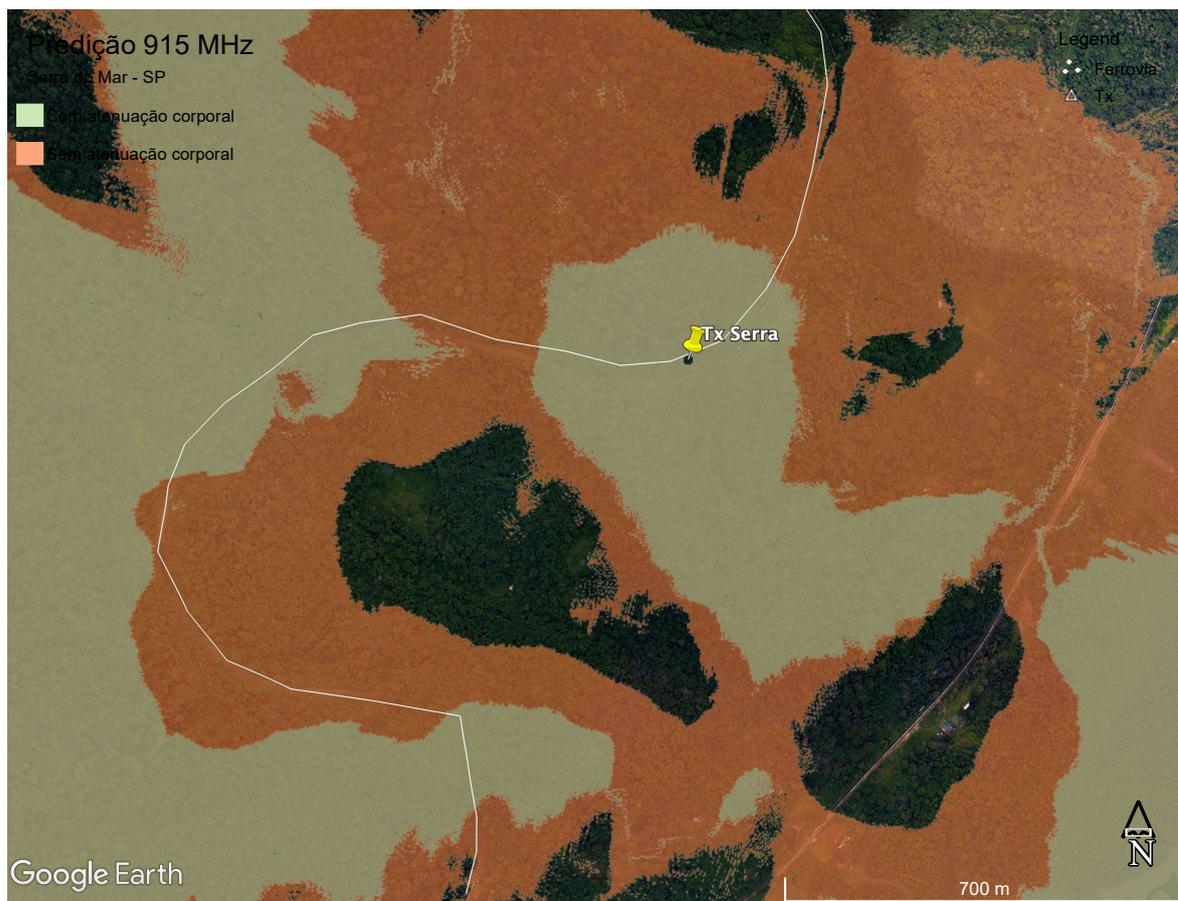
Fonte: O autor

Quadro 8 – Parâmetros da predição de cobertura – Serra do Mar – 915 MHz

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Potência de TX	1 W (30 dBm)
Limiar de recepção	-120 dBm
Ganho de antena TX	5 dBi
Ganho de antena RX	0 dBd (ganho unitário)
Perda nos cabos e conectores	1 dB
Altura do Tx	4 metros
Altura do móvel	1 metro
Refratividade	301 N
Condutividade do solo	0.005 S/m
Permissividade relativa do solo	15
Clima	Continental subtropical
Polarização	Vertical
Nível de confiança	95%
Variabilidade da situação	50%
Atenuação corporal (quando aplicável)	15.5 dB

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 44 – Área de cobertura 915 MHz – Serra do Mar



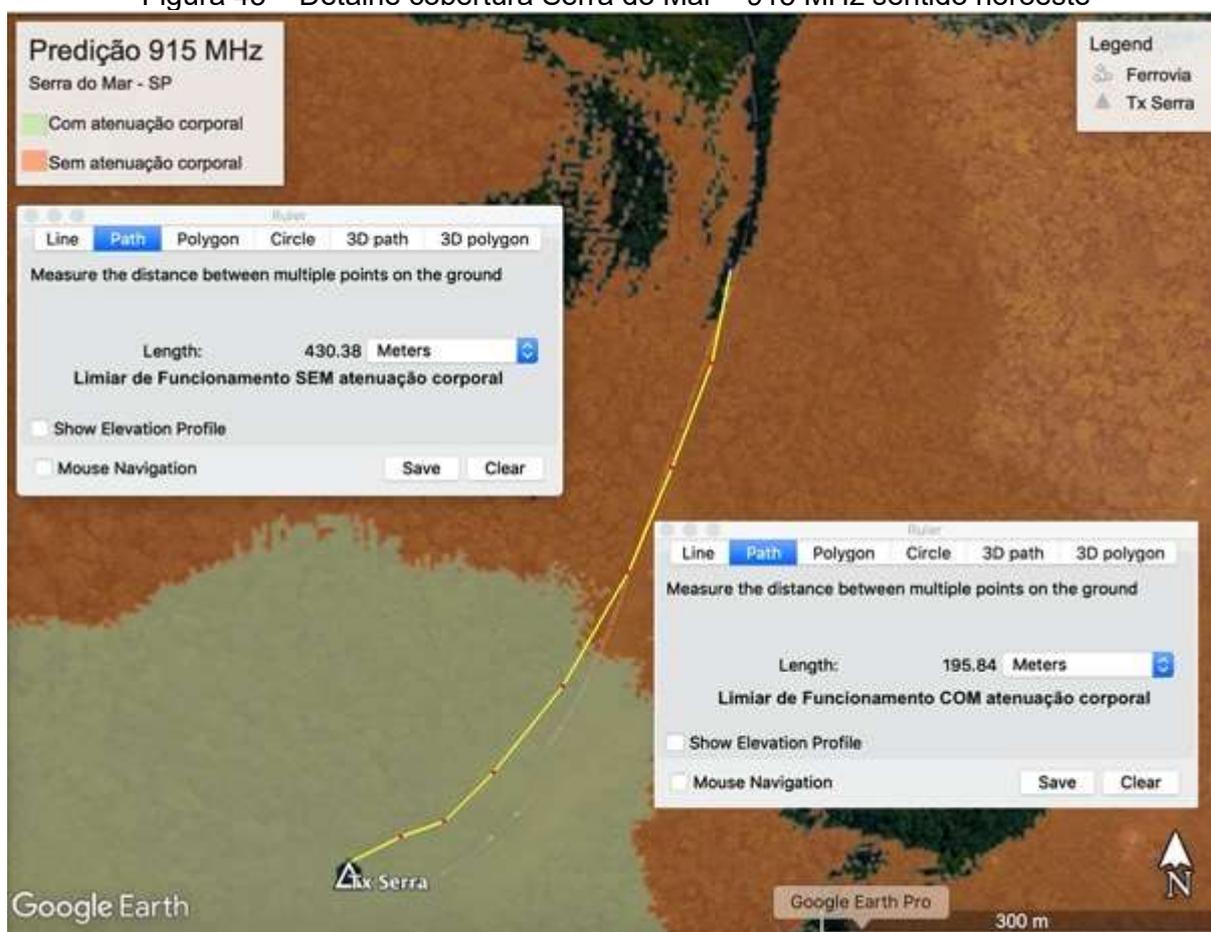
Fonte: O autor

Da mesma forma que no trecho de Louveira, a previsão para a faixa de 915 MHz no trecho da Serra do Mar apresentou uma área de cobertura maior que a de 433 MHz, devido aos mesmos motivos:

- Potência de transmissão permitida pela norma ANATEL 20 dB maior que na faixa de 433 MHz;
- Uso de antena com ganho de 5 dBi, também permitida pela norma ANATEL;
- Sensibilidade do módulo de RF LoRA 10 dB melhor que na faixa de 433 MHz.

A Figura 45 mostra que a distância alcançada para a faixa de 915 MHz no sentido noroeste da estação na Serra do Mar sem o efeito da atenuação corporal foi de 430,38 metros e que, ao aplicar essa atenuação, a distância máxima foi de 195,84 metros.

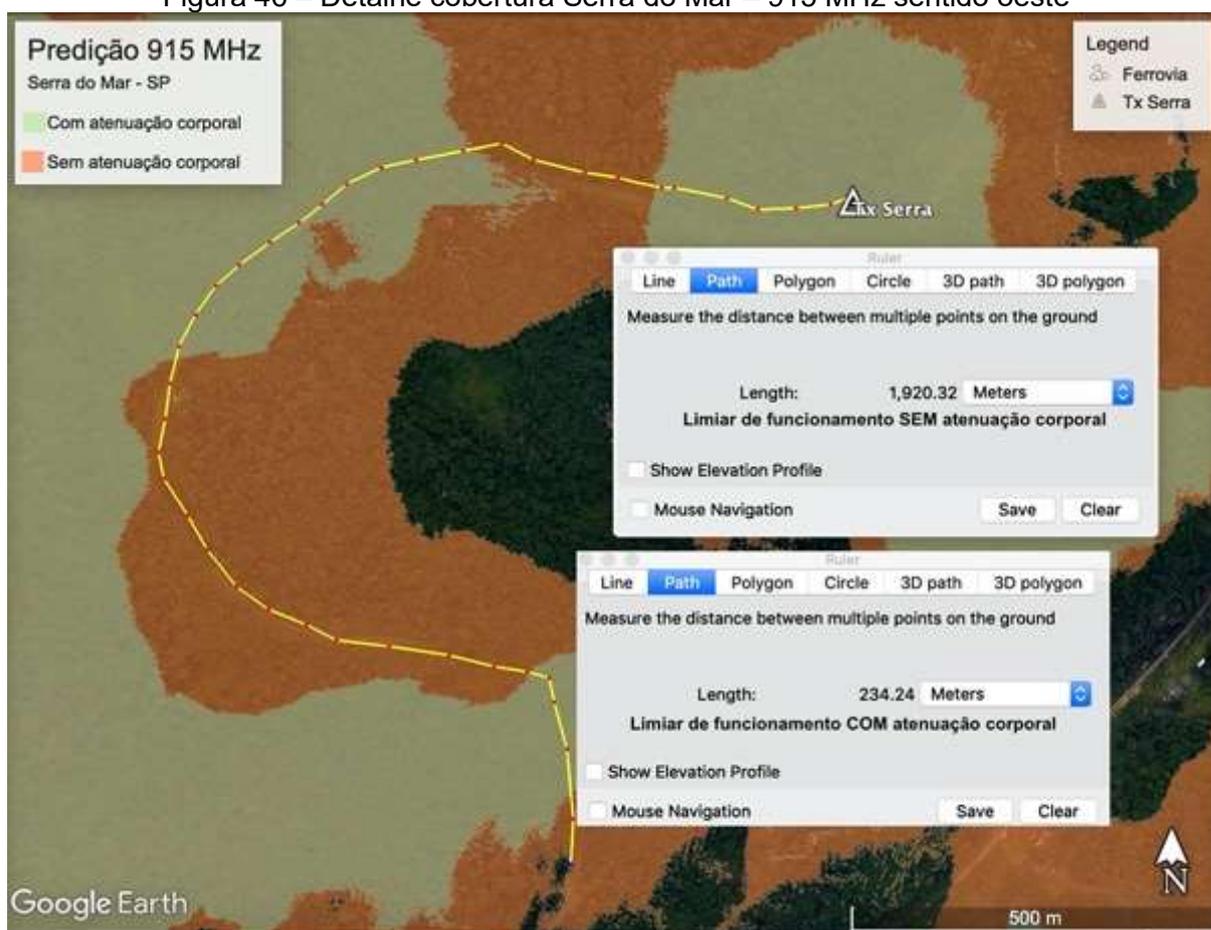
Figura 45 – Detalhe cobertura Serra do Mar – 915 MHz sentido noroeste



Fonte: O autor

A Figura 46 mostra que a distância alcançada para a faixa de 915 MHz no sentido oeste da estação na Serra do Mar sem o efeito da atenuação corporal foi de 1.920 metros e que, ao aplicar essa atenuação, a distância máxima foi de 234,24 metros.

Figura 46 – Detalhe cobertura Serra do Mar – 915 MHz sentido oeste

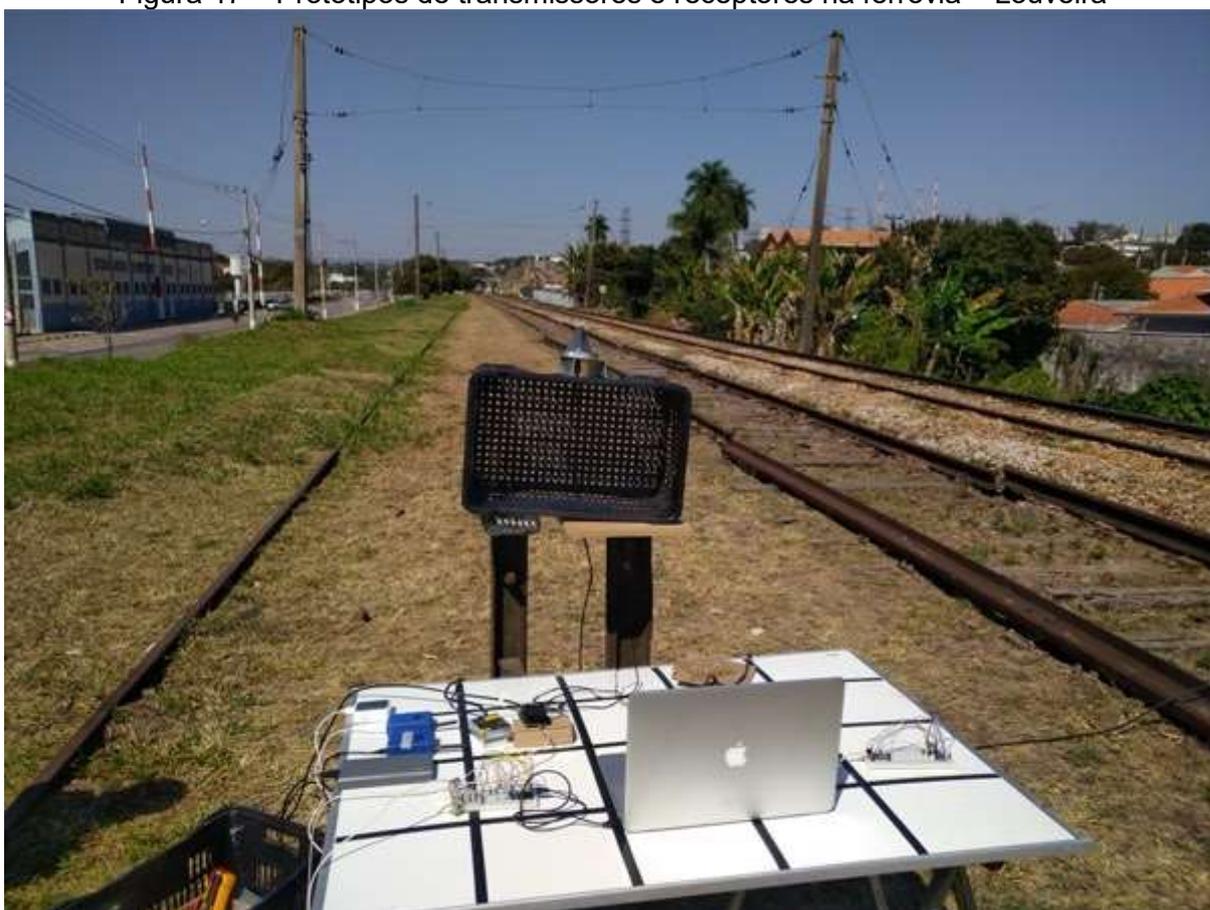


Fonte: O autor

### 5.3 Medidas em campo com o protótipo – Louveira

Para validar as previsões realizadas pelo *software* Radio Mobile (COUDÉ, 2019), foram executadas medidas em campo utilizando protótipos nas faixas de 433 MHz e 915 MHz no trecho ferroviário de Louveira, apresentado nas Figuras 47, 48 e 49.

Figura 47 – Protótipos de transmissores e receptores na ferrovia – Louveira



Fonte: O autor

Os protótipos dos transmissores ficaram na bancada a 80 centímetros do solo, sendo que para a faixa de 915 MHz foi utilizado um amplificador para elevar a potência a 1 watt (30 dBm) e a antena ficou a cerca de 1,60 metro do solo.

Figura 48 – Medidas na ferrovia com os protótipos



Fonte: O autor

Ambos os transmissores foram alimentados pelas portas USB de computador e os receptores foram alimentados por banco de baterias, sendo os receptores mantidos na altura da cintura durante as medidas de forma a simular um dispositivo preso ao cinto do trabalhador.

Figura 49 – Avaliação do alcance do sinal



Fonte: O autor

Com os dispositivos receptores em ambas as faixas de frequência, caminhou-se nas direções norte e sul até o limite de alcance do sinal de cada um, marcando com um GPS as coordenadas desses pontos.

#### **5.4 Distância e tempo de alerta entre veículo e trabalhador**

A Figura 50 apresenta a imagem da área sob teste em Louveira, indicando o caminho percorrido com os receptores.

Figura 50 – Medidas em campo com o protótipo – Louveira



Fonte: O autor

Os resultados obtidos em ambas as faixas de frequência são apresentados no Quadro 9.

Quadro 9 – Distância e tempo de alertas na região de Louveira

Local e frequência	VMA do veículo trecho Louveira km/h)	Distância entre primeiro aviso e chegada do veículo	Tempo entre primeiro aviso e chegada do veículo
433 MHz, situação menos favorável	60	276 metros	17 segundos
433 MHz, situação mais favorável	60	322 metros	19 segundos
915 MHz, situação menos favorável	60	777 metros	47 segundos
915 MHz, situação mais favorável	60	1.095 metros	66 segundos

Fonte: Elaborado pelo autor

Considerando os resultados com a inclusão da atenuação corporal e admitindo que o veículo ferroviário viaje nesse trecho em VMA de 60 km/h, conclui-se que: na faixa de 433 MHz, no melhor caso, o trabalhador teria um tempo total para identificar o aviso e deixar a via de 19 segundos e, no pior caso, esse tempo seria de 17 segundos, ambos muito próximos dos 15 segundos recomendados para esse tipo de alerta (RSSB, 2015); para a faixa de 915 MHz, no melhor o caso o trabalhador teria um tempo total para identificar o aviso e deixar a via de 66 segundos e, no pior caso, esse tempo seria de 47 segundos, atendendo com folga as recomendações do setor.

Para a Serra do Mar, não houve medida com o protótipo, mas, com base na predição de cobertura, a distância e o tempo de alertas nesse ambiente seriam próximos aos apresentados no Quadro 10.

Quadro 10 – Distância e tempo de alertas na Serra do Mar (previsão)

<b>Local e frequência</b>	<b>VMA do veículo, trecho Serra do Mar (km/h)</b>	<b>Distância entre primeiro aviso e chegada do veículo</b>	<b>Tempo entre primeiro aviso e chegada do veículo</b>
433 MHz, situação menos favorável	35	99 metros	10 segundos
433 MHz, situação mais favorável	35	215 metros	22 segundos
915 MHz, situação menos favorável	35	195 metros	20 segundos
915 MHz, situação mais favorável	35	234 metros	24 segundos

Fonte: Elaborado pelo autor

Como na Serra do Mar a velocidade máxima dos veículos ferroviários é de 35 km/h, então, mesmo com uma área de cobertura reduzida quando comparada à do trecho de Louveira, o tempo total para identificar o aviso e deixar a via utilizando a faixa de 915 MHz seria de 20 segundos no pior caso e de 24 segundos na melhor situação, ambos acima dos 15 segundos recomendados para esse tipo de alerta (RSSB, 2015). Para a faixa de 433 MHz, esses tempos seriam no melhor caso de 22 segundos e, no pior caso, de 10 segundos, este último não atendendo às recomendações do setor.

A faixa de 915 MHz apresentou resultados melhores que a faixa de 433 MHz, atendendo integralmente as recomendações do setor. Isso se deve basicamente às restrições de potência máxima e uso de antenas impostas pelas normas da ANATEL para a faixa de 433 MHz, além de a sensibilidade do receptor na faixa de 915 MHz ser 10 dB melhor em relação à da faixa de 433 MHz.

Diante dos resultados, observa-se que em ambos os cenários o uso da faixa de 915 MHz atende as recomendações do setor para esse tipo de alerta. Considerando que a Serra do Mar é um dos ambientes mais agressivos para a propagação de RF em ferrovias no Brasil, pode-se inferir que qualquer outro trecho ferroviário brasileiro seria atendido utilizando esse sistema.

### 5.5 Comparativo de custos entre o Alertor e EPIs ferroviários

Para comparação de custos, é necessário fazer uma separação entre o receptor e o transmissor desse sistema, pois, como são poucas locomotivas (algo em torno de 3.000) e dezenas de milhares de trabalhadores, a quantidade de equipamentos transmissores e receptores a serem utilizados pelos operadores ferroviários é diferente.

Na montagem do protótipo do receptor do Alertor em 915 MHz foram utilizados os componentes apresentados no Quadro 11.

Quadro 11 – Custo do receptor

Item	Descrição	Valor (R\$)	Fornecedor
1	Placa Arduino nano	34,90	filipeflop.com
2	Placa LoRa	47,08 (US\$ 11,95)	SparkFun.com
3	Bateria 1528-1857-NB	49,25 (US\$ 12,50)	Digikey.com
4	Antena (553-1697-ND)	22,62 (US\$ 5,74)	Digikey.com
5	Case para receptor	7,00	Estimado
6	Módulo carregador de bateria Arduino	31,00	filipeflop.com
7	Clock Arduino	11,00	filipeflop.com
8	Micro SD Card Arduino	10,90	filipeflop.com
7	Miscelâneas	38,70	Estimado
<b>Custo total do receptor em reais</b>		<b>252,45</b>	

Fonte: Elaborado pelo autor

O protótipo do transmissor utiliza, além das placas, cabos, conectores e antenas especiais, apresentados no Quadro 12.

Quadro 12 – Custo do transmissor

Item	Descrição	Valor (R\$)	Fornecedor
1	Placa Arduino nano	34,90	filipeflop.com
2	Placa RF LoRa	47,08 (US\$ 11,95)	SparkFun.com
3	6 metros cabo LMR 400	119,40	ARS antenas
4	Antena baixo perfil 900 MHz	215,67 (US\$ 54,74)	PCTEL antennas
5	Conectores de RF	43,20	ARS antenas
6	Amplificador 1 Watt 900 MHz	775,76 (US\$ 196,90)	Digikey.com
<b>Custo total do transmissor em reais</b>		<b>1.236.01</b>	

Fonte: Elaborado pelo autor

O Quadro 13 apresenta os EPIs comuns a um trabalhador de via permanente da empresa MRS Logística, sendo comum aos operadores ferroviários a determinação de tipo, modelo e marca de EPIs permitidos para cada função.

Quadro 13 – Custo de EPIs comuns no setor ferroviário

Descrição	Valor (R\$)	Fornecedor
Capacete de segurança, classe b, tipo aba frontal, azul pastel	42,78	Diafer.com
Carneira (Capacete)	5,16	Casa do Operário
Óculos de Segurança peça única de policarbonato (modelo Águia)	19,81	Net Suprimentos
Óculos Seg. - Incolor	17,96	Net Suprimentos
Óculos Seg. - Fumê	44,16	Astro Distribuidora
Protetor auditivo do tipo inserção	1,03	Net Suprimentos
Abafador de ruído para capacete	106,31	Net Suprimentos
Luva de segurança confeccionada em vaqueta	10,18	Diafer.com
Perneira segurança PVC, com ajuste em velcro	18,51	Diafer.com
Botinas Derby com solado de borracha - (manobreiro)	80,20	Net Suprimentos
Bota de PVC cano longo com biqueira e palmilha de aço	65,72	Net Suprimentos
Conjunto impermeável R 7 de segurança, cor amarela	174,00	Superepi.com
<b>Custo total de todos os EPIs em reais</b>	<b>585,82</b>	

Fonte: Adaptado de MRS, 2012.

Na comparação entre os preços de EPIs normalmente utilizados no setor ferroviário e o custo de um receptor, há que se considerar que o receptor terá sua duração limitada ao tempo de vida útil da bateria, ou seja, se forem utilizadas baterias de lítio que permitam de 300 a 500 ciclos de carga e que possuam uma duração em uso de ao menos dois dias, teremos um horizonte de durabilidade do receptor ao redor de dois anos, podendo chegar próximo de três anos dependendo das condições de uso, sendo que vários EPIs ferroviários têm prazo máximo de validade de um ano e alguns, como as botas por exemplo, possuem vida útil menor ainda.

Por meio desse levantamento simples de custos foi possível identificar que os valores envolvidos na construção de uma única unidade do Alertor são próximos dos preços de outros equipamentos de proteção individual normalmente empregados nas atividades cotidianas das ferrovias, indicando assim que esse equipamento está alinhado com a realidade de custos praticada no mercado ferroviário brasileiro para equipamentos de proteção individual.

## 6 CONCLUSÃO

No Brasil, morrem anualmente em média 249 pessoas nas ferrovias de carga em acidentes por atropelamentos e choques com trens (somente no ano de 2018, foram 264 mortes); além disso, ocorrem centenas de acidentes não fatais. Os dados divulgados pela Agência Nacional de Transporte Terrestre (ANTT) reportam esses números de forma geral e não especificam quais e quantos acidentes ocorreram especificamente com trabalhadores ferroviários; assim, esses números também contemplam pessoas alheias a esse ambiente, porém a maior exposição ao risco de atropelamento e choque por trens é justamente a dos trabalhadores das ferrovias.

Os métodos atualmente empregados pelos operadores ferroviários para mitigação desse risco são falíveis, por isso a necessidade de encontrar soluções que aumentem a segurança e reduzam esse risco a níveis aceitáveis dentro de custos compatíveis com a realidade das ferrovias, é latente.

Este trabalho propôs o emprego de uma rede de sensores sem fio como forma de automatizar o aviso de aproximação entre veículos ferroviários e trabalhadores que estejam na via, visando auxiliar o aumento da segurança nesse ambiente por meio de advertência individual e automática.

A sua contribuição deve-se confirmação de bons resultados apontados pela pesquisa de campo em âmbito operacional real, considerando diversificados ambientes ferroviários brasileiros e as diferentes velocidades em que circulam os trens. Ao final, foi desenvolvido um protótipo funcional, validado em campo, com custos equivalentes ao de outros EPIs já utilizados nas ferrovias de carga.

Os resultados mostraram que um sistema utilizando uma RSSF em frequência não licenciada de 915 MHz, mesmo em ambientes agressivos para a propagação de RF, condição esporádica nas ferrovias, é capaz de avisar individualmente um trabalhador da aproximação de veículos ferroviários com ao menos 20 segundos de antecedência. Para a condição típica da propagação de RF nas ferrovias, esse tempo supera os 45 segundos, atendendo as normas internacionais que recomendam que esse tipo de alerta chegue ao trabalhador ao menos 15 segundos antes da aproximação de um trem.

## 6.1 Trabalhos futuros

O sistema aqui proposto é apenas uma semente, a qual pode avançar em diversas frentes na segurança dos trabalhadores ferroviários.

Nas ferrovias de carga, principalmente em países de grandes dimensões, o uso de redes celulares para funcionamento on-line de dispositivos de segurança é impraticável, devido à inexistência de cobertura em grande parte destas ferrovias. Mesmo assim, é possível adicionar novas funcionalidades ao receptor, como GPS, para realizar o rastreamento dos trabalhadores durante toda sua atividade e a descarga dessas informações quando o dispositivo estiver sendo carregado, seja através de porta USB, seja por interface *wireless*, tanto para o planejamento das atividades como para o aprimoramento das sindicâncias em casos de incidentes e acidentes.

Adicionando sistemas de silenciamento e ativação automática de transmissor ao Alertor, é possível avisar o trem da presença de trabalhadores na via pelo próprio dispositivo do trabalhador de forma automática. Assim, quando o dispositivo receber a informação da aproximação do trem, ativar-se-ia o transmissor, que enviaria de volta a informação de “homem na via”, possibilitando que o maquinista realize uma redução da velocidade do trem, o que implicaria o aumento do tempo de aproximação e, conseqüentemente, do tempo disponível para o trabalhador deixar a via.

Uma vez que todos os veículos ferroviários estejam equipados com transmissores enviando ciclicamente sua posição, é possível realizar outras indicações na ferrovia, como detectar a aproximação de trens antecipadamente na entrada de túneis através de um sistema de sinalização no qual o trabalhador, em especial o Ronda, que circula diariamente na ferrovia de forma solitária, possa visualizar se há ou não veículos ferroviários se aproximando para assim decidir qual o melhor horário para entrar em um túnel, com base no tempo necessário para atravessá-lo ou no tempo necessário para atingir a primeira área de escape dentro desse túnel.

A introdução de redundância no sistema proposto, permitiria aumentar sua confiabilidade bem como sua disponibilidade.

As ferrovias de carga oferecem vários desafios para a segurança dos trabalhadores que certamente podem ser mitigados com o uso de dispositivos com características semelhantes às do proposto neste trabalho.

## REFERÊNCIAS

ALAWAD, H.; KAEWUNRUEN, S. Wireless Sensor Networks: Toward Smarter Railway Stations. **Infrastructures**, v. 3, n. 3, p. 24, 2018.

ANRITSU. **LMR Master Land Mobile Radio Modulation Analyzer: S412E**. Disponível em: <https://www.anritsu.com/en-us/test-measurement/products/s412e>. Acesso em: 29 abr. 2019.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTADORES FERROVIÁRIOS (ANTF). **Releases**. Disponível em: <https://www.antf.org.br/releases/mais-de-r-52-bi/>. Acesso em: 27 mar. 2019a.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTADORES FERROVIÁRIOS (ANTF). **Informações gerais**. Disponível em: <https://www.antf.org.br/informacoes-gerais/>. Acesso em: 27 mar. 2019b.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTE TERRESTRE (ANTT). **Anuário estatístico**. 2019a. Disponível em: [http://www.antt.gov.br/ferrovias/arquivos/Anuario\\_Estatistico.html](http://www.antt.gov.br/ferrovias/arquivos/Anuario_Estatistico.html). Acesso em: 19 fev. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTE TERRESTRE (ANTT). **Transporte de Cargas Ferroviário**. Disponível em: [http://www.antt.gov.br/cargas/arquivos\\_old/Ferroviano.html](http://www.antt.gov.br/cargas/arquivos_old/Ferroviano.html). Acesso em: 05 abr. 2019b.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTE TERRESTRE (ANTT). **Terminologia básica**. Disponível em: [http://www.antt.gov.br/backend/galeria/arquivos/14\\_\\_terminologia\\_basica.pdf](http://www.antt.gov.br/backend/galeria/arquivos/14__terminologia_basica.pdf). Acesso em: 19 fev. 2019c.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTE TERRESTRE (ANTT). **Declaração de Rede**. 2018. Disponível em: [http://www.antt.gov.br/ferrovias/arquivos/Declaracao\\_de\\_Rede\\_2018.html](http://www.antt.gov.br/ferrovias/arquivos/Declaracao_de_Rede_2018.html). Acesso em: 05 maio 2019.

ARZ, J.-P.; GETTLIFFE, J.-P.; DELATTRE, P. Effect of wearing hearing protectors on the audibility of railway warning signals: an experimental study. **International Journal of Occupational Safety and Ergonomics**, v. 24, n. 1, p. 149-159, 2018.

BAULK, S. D. *et al.* Chasing the silver bullet: Measuring driver fatigue using simple and complex tasks. **Accident Analysis and Prevention**, v. 40, n. 1, p. 396-402, 2008.

BONDAVALLI, A. *et al.* System-of-Systems to Support Mobile Safety Critical Applications: Open Challenges and Viable Solutions. **IEEE Systems Journal**, v. 12, n. 1, p. 250-261, 2018.

BRASIL. Ministério da Infraestrutura. **Grandes Números**. Disponível em: <http://www.transportes.gov.br/component/content/article?id=5380>. Acesso em: 20 mar. 2019.

BURTON, A. **Richard Trevithick**: Giant of Steam. [S.l.]: Ed. Aurum Press, 2002.

CASTILLO-EFFER, M.; QUINTELA, D. H.; MORENO, W.; JORDAN, R.; WESTHOFF, W. Wireless sensor networks for flash-flood alerting. *In* IEEE INTERNATIONAL CARACAS CONFERENCE ON DEVICES, CIRCUITS AND SYSTEMS, 5., 2004, Punta Cana. **Proceedings [...]**. Punta Cana, IEEE, 2004, v. 1, p. 142-146.

CHAU, N.; MUR, J. M.; TOURON, C.; BENAMGHAR, L.; DEHAENE, D. Correlates of occupational injuries for various jobs in railway workers: A case-control study. **Journal of Occupational Health**, v. 46, n. 4, p. 272-280, 2004.

COUDÉ, R. **Radio Mobile**: Freeware by VE2DBE. 2019. Disponível em <https://www.ve2dbe.com/english1.html>. Acesso em: 10 jul. 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Histórico**. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/ferrovias/historico.asp>. Acesso em: 14 abr. 2019.

ETKIN, R.; PAREKH, A.; TSE, D. Spectrum sharing for unlicensed bands. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 25, n. 3, p. 517-528, 2007.

EUROPEAN COMMISSION. The Community Research and Development Information Service. **ALARP**: A railway automatic track warning system based on distributed personal mobile terminals. 2017. Disponível em: <https://cordis.europa.eu/project/rcn/93402/factsheet/en>. Acesso em: 24 abr. 2019.

EUROPEAN COMMISSION. Transport Research and Innovation Monitoring and Information System. **ALARP**: A railway automatic track warning system based on distributed personal mobile terminals. Disponível em: <https://trimis.ec.europa.eu/project/railway-automatic-track-warning-system-based-distributed-personal-mobile-terminals#tab-results>. Acesso em: 24 abr. 2019.

FELICE, F. DE; PETRILLO, A. Methodological approach for performing human reliability and error analysis in railway transportation system. **International Journal of Engineering and Technology**, v. 3, n. 5, p. 341-353, 2011.

FOGLIATTI, M. C.; FILIPPO, S.; GOUDARD, B. **Avaliação de Impactos Ambientais**: Aplicação aos Sistemas de Transporte. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2004. 249 p.

FORSGREN, M.; ARONSSON, M.; GESTRELIUS, S. Maintaining tracks and traffic

flow at the same time. **Journal of Rail Transport Planning and Management**, v. 3, n. 3, p. 111-123, 2013.

FEDERAL RAILROAD ADMINISTRATION. Office of Safety Analysis. **Home**. 2019. Disponível em: <https://safetydata.fra.dot.gov/OfficeofSafety/Default.aspx>. Acesso em: 20 mar. 2019.

FEDERAL RAILROAD ADMINISTRATION. Railroad Workplace Safety; Adjacent-Track On-Track Safety for Roadway Workers. **Federal Register**, Nov. 30th, 2011. Disponível em: <http://go.galegroup.com/ps/i.do?p=AONE&u=capes&id=GALE|A273678889&v=2.1&it=r&sid=AONE&asid=b586dfbc>. Acesso em: 07 abr. 2019.

GHOFRANI, F.; HE, Q.; GOVERDE, R. M. P.; LIU, X. Recent applications of big data analytics in railway transportation systems: A survey. **Trans. Res. Part C Emerg. Technol.**, v. 90, p. 226-246, 2018.

HARDY, A. E. J.; JONES, R. R. K. Warning horns-Audibility versus environmental impact. **Journal of Sound and Vibration**, v. 293, n. 3-5, p. 1091-1097, 2006.

HATA, M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services. **IEEE Trans. Veh. Tech.**, v. 29, n. 3, p.317-325, 1980.

HUFFORD, G. A.; LONGLEY, A. G.; KISSICK, W. A. A Guide to the Use of the ITS Irregular Terrain Model in the Area Prediction Mode. **NTIA**, 1982. Disponível em: <https://www.ntia.doc.gov/report/1982/guide-use-its-irregular-terrain-model-area-prediction-mode>. Acesso em: 11 fev. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTÁTICA (IBGE). IBGE mapeia a infraestrutura dos transportes no Brasil. **Agência IBGE Notícias**, 25 nov. 2014. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/14707-asi-ibge-mapeia-a-infraestrutura-dos-transportes-no-brasil>. Acesso em: 25 mar. 2019.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU). Radiocommunication Sector. **Rec. ITU-R P.1406-2**: Propagation effects relating to terrestrial land mobile and broadcasting services in the VHF and UHF bands. July 2015.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU). Radiocommunication Sector. **Rec. ITU-R P.525-3**: Calculation of free-space attenuation, Sep. 2016a.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU). Radiocommunication Sector. **Rec. ITU-R P.833-9**: Attenuation in vegetation, Sep. 2016b.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU). Radiocommunication Sector. **Rec. ITU-R P.1411-9**: Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz, Jun. 2017.

KEYSIGHT TECHNOLOGIES. **83752A Synthesized Sweeper**: 0.01 - 20 GHz. Disponível em: <https://www.keysight.com/en/pd-1000001888%3Aepsg%3Apro-pn-83752A/synthesized-sweeper-001-20-ghz?cc=BR&lc=por>. Acesso em: 09 maio 2019.

KUMAR, S.; CHAURASIYA, V. K. A multisensor data fusion strategy for path selection in Internet-of-Things oriented wireless sensor network (WSN). **Concurrency Computation**, v. 30, n. 18, p. 1-14, 2018.

KUMBHAR, A. Overview of ISM Bands and Software-Defined Radio Experimentation. **Wireless Personal Communications**, v. 97, n. 3, p. 3743-3756, 2017.

KROKOS, K. J.; BAKER, D. P. Preface to the special section on classifying and understanding human error. **Human Factors**, v. 49, n. 2, p. 175-177, 2007.

KYRIAKIDIS, M.; MAJUMDAR, A.; OCHIENG, W. Y. The human performance railway operational index: a novel approach to assess human performance for railway operations. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 170, p. 226-243, 2018.

LI, D.; WANG, J.; CHEN, M.; ZHANG, Z.; LI, Z. Base-band involved integrative modeling for studying the transmission characteristics of wireless link in railway environment. **Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking**, n. 81, 2015.

MCCLANACHAN, M.; TOFT, Y.; NOORUDHEEN, N. Track worker safety: investigating the contributing factors and technology solutions. *In*: CONFERENCE ON RAILWAY ENGINEERING, 8., 2012, Brisbane. **Proceedings [...]**. Brisbane: Barton, A.C.T.; Engineers Australia, 2012.

MCLNNIS, C. A. *et al.* Time of day effects on railroad roadway worker injury risk. **Journal of Safety Research**, v. 61, p. 53-64, 2017.

MONTECCHI, L.; LOLLINI, P.; BONDAVALLI, A. Quantifying the Impact of External Attacks on a Distributed Automatic Track Warning System. *In*: ANNUAL IEEE/IFIP INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEPENDABLE SYSTEMS AND NETWORKS WORKSHOPS, 45., 2015, Rio de Janeiro. **Proceedings [...]** Rio de Janeiro: DSN-W, 2015. p. 33-38.

MRS LOGÍSTICA. **Relatório anual 2017**. Rio de Janeiro: MRS, 2018. Disponível em: [http://ri.mrs.com.br/default\\_download.asp?NArquivo=Relat%F3rio%2520Anual%25202017.pdf&arquivo=5E1FDFAD-0DFD-48C5-A0A3-B336ADF20B67](http://ri.mrs.com.br/default_download.asp?NArquivo=Relat%F3rio%2520Anual%25202017.pdf&arquivo=5E1FDFAD-0DFD-48C5-A0A3-B336ADF20B67). Acesso em: 20 mar. 2019.

MRS LOGÍSTICA. **Catálogo de EPIs 2012**. 2012. Disponível em: [http://www.mrs.com.br/relacoescomfornecedores/Catalogo\\_de\\_EPIs\\_X\\_Cargos\\_colaboradores\\_MRS\\_v8.pdf](http://www.mrs.com.br/relacoescomfornecedores/Catalogo_de_EPIs_X_Cargos_colaboradores_MRS_v8.pdf). Acesso em: 03 maio 2019.

MIYOSHI, E. M.; SANCHES, C. A. **Projeto de Sistemas Rádio**. São Paulo: Ed.

Erica, 2008.

NABIAS, R. J. S. **Manual básico de Engenharia Ferroviária**. São Paulo: Ed. Oficina dos Textos, 2014.

NIE, Z. *et al.* In-Situ Characterizations of 1–200 MHz Radio frequency signal coupling with human body. **Biomedical Engineering: Applications, Basis and Communications**, v. 24, n. 03, p. 285–294, 2012.

OKUMURA, Y. Field Strength and Its Variability in UHF and VHF Land- Mobile Radio Service. **Review Electrical Communication Laboratory**, v. 16, n. 9-10, p. 825-873, 1968.

RICE P. L.; LONGLEY, A. G.; LONGLEY, N. K. A.; BARSIS, A. P. Transmission Loss Predictions for Tropospheric Communication Circuits, **NBS Tech. Note**, v.-II, n. 101, 1966 (available as an NTIA report).

RAIL SAFETY AND STANDARDS BOARD LIMITED (RSSB). **Audibility and Visibility of Trains Audibility and Visibility of Trains**. London: RSSB, 2015. Disponível em: <https://www.rssb.co.uk/rgs/standards/GMRT2131%20Iss%201.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2019.

ROLT, L. T. C. **The Cornish Giant**: The Story of Richard Trevithick, Father of the Steam Locomotive. [S.l.]: Ed. Lutterworth Press, 1960.

SANCHES, C. A. **Projetando Redes Wlan**: Conceitos e Práticas. São Paulo: Ed. Erica, 2005.

SEMINATORE, A.; GHELARDONI, L.; CECCARELLI, A.; FALAI, L.; SCHULTHEIS, M.; MALINOWSKY, B. ALARP: A railway automatic track warning system based on distributed personal mobile terminals. *In*: TRANSPORT RESEARCH ARENA, 4., 2012, Athens. **Proceedings [...]**. Athens: TRA, 2012.

SILVA, H. D.; AFONSO, J. A.; ROCHA, L. A. Body Attenuation and Path Loss Exponent Estimation for RSS-Based Positioning in WSN. **Wireless Personal Communications**, v. 94, n. 3, p. 835-857, 2017.

STOPATTO, S. **Via permanente ferroviária**: conceitos e aplicações. São Paulo: T. A. Queiroz; Ed. da USP; Companhia Brasileira de Trens Urbanos, 1987.

UNITED STATES. Bureau of Transportation Statistics. **Fatalities and Injuries of On-Duty Railroad Employees**. 2019. Disponível em: <https://www.bts.gov/content/fatalities-and-injuries-duty-railroad-employees>. Acesso em: 20 mar. 2019a.

UNITED STATES. Central Intelligence Agency. **The World Factbook**. Disponível em: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/>. Acesso em: 05 abr. 2019b.

VALDES, Alexandre. Transporte ferroviário: há futuro para uma logística mais eficiente e com mais qualidade? **Associação Brasileira da Indústria Ferroviária (ABIFER)**, 07 dez. 2018. Disponível em: <https://abifer.org.br/transporte-ferroviario-ha-futuro-para-uma-logistica-mais-eficiente-e-com-mais-qualidade/>. Acesso em: 19 abr. 2019.

YUAN, D.; KANHERE, S. S.; HOLLICK, M. Instrumenting Wireless Sensor Networks: A survey on the metrics that matter. **Pervasive and Mobile Computing**, v. 37, p. 45-62, 2017.

ZOLLNER. **Automatic Warning Systems The AUTOPROWA® System**. Disponível em: <https://www.zoellner.de/en/automatic-warning-systems/>. Acesso em: 18 jul. 2019.

## **ANEXOS**

### **Anexo A – Pedido de esclarecimento - ANTT**

Em função dos dados de acidentes da ANTT não apresentarem nível de detalhamento suficiente para diferenciar os acidentes de trabalhadores ferroviários e de não trabalhadores, foi submetido pedido de esclarecimento destes dados, via lei de acesso a informação.

**Dados do Pedido**

Protocolo	50650005284201881
Solicitante	CARLOS ALBERTO SANCHES
Data de Abertura	01/11/2018 19:38
Orgão Superior Destinatário	MTPA – Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil
Orgão Vinculado Destinatário	ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres
Prazo de Atendimento	26/11/2018
Situação	Respondido
Status da Situação	Acesso Concedido (Resposta solicitada inserida no e-SIC)
Forma de Recebimento da Resposta	Pelo sistema (com avisos por email)
Resumo	Prezados Senhores, : O registro de acidentes no anuário de 2018, apresenta apenas casos totais e por ferrovia, entretanto sem maiores detalhes.
Detalhamento	Prezados Senhores, : O registro de acidentes no anuário de 2018, apresenta apenas casos totais e por ferrovia, entretanto sem maiores detalhes. Gostaria de saber se a dados específicos de acidentes que envolvam trabalhadores das ferrovias? Pois ao olhar os dados gerais não é possível distinguir/quantificar acidentes ocorrido por pessoas alheias as ferrovias e trabalhadores ferroviários. Desde já muito Obrigado.

**Dados da Resposta**

Data de Resposta	22/11/2018 11:43
Tipo de Resposta	Acesso Concedido
Classificação do Tipo de Resposta	Resposta solicitada inserida no e-SIC
Resposta	

Prezado Senhor Carlos Alberto Sanches,

Em atenção à demanda registrada no Sistema Eletrônico do Serviço de Informação ao Cidadão sob o nº 50650.005284/2018-81, a Ouvidoria da ANTT obteve os seguintes esclarecimentos da Gerência de Controle e fiscalização de Infraestrutura e Serviços.

*“Em atendimento ao Despacho nº 1219/2018/SIC/OUVIDORIA, de 06/11/2018, fl. 02, que trata do Serviço de Informação ao Cidadão - SIC, motivado pela Lei de Acesso à Informação (Lei nº 12.527/11), que trata do questionamento abaixo, tem-se a saber:*

*Questionamento: "O registro de acidentes no anuário de 2018, apresenta apenas casos totais e por ferrovia, entretanto sem maiores detalhes. Gostaria de saber se a dados específicos de acidentes que envolvam trabalhadores das ferrovias? Pois ao olhar os dados gerais não é possível distinguir/quantificar acidentes ocorridos por pessoas alheias as ferrovias e trabalhadores ferroviários ".*

*Resposta:*

*a) Os dados apresentados pelo ANUÁRIO ESTATÍSTICO DO SETOR*

*FERROVIÁRIO - 2018 são obtidos a partir de informações enviadas mensalmente pelas concessionárias ferroviárias através do sistema SAFF/ANTT, nos termos da Resolução ANTT nº 2502/2007, abrangendo informações sobre operação, produção e acidentes ferroviários;*

- b) *Os dados apresentados no referido anuário estão em formato de fácil manipulação (Excel) e trazem estatísticas de todo e qualquer envolvido em acidentes ferroviários.*
- c) *Quando da comunicação de acidentes ferroviários, as concessionárias apresentam os dados sem a discriminação quanto ao acidentado, se trabalhadores das ferrovias ou não. ”*

JOSÉ LUIZ DE OLIVEIRA

Gerente de Controle e fiscalização de Infraestrutura e Serviços

Esclarecemos que poderá ser interposto recurso à Superintendência de Infraestrutura e Serviços de Transporte Ferroviário de Cargas no prazo de até 10 (dez) dias.

Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT

SCE Sul:: Polo 8:: Projeto Orla

Trecho 03:: Lote 10 Brasília - DF:: CEP: 70200-003

Fone: 166

[www.antt.gov.br](http://www.antt.gov.br)

Responsável pela Resposta	Gerência de Controle e fiscalização de Infraestrutura e Serviços
Destinatário do Recurso de Primeira Instância:	Superintendência de Infraestrutura e Serviços de Transporte Ferroviário de Cargas
Prazo Limite para Recurso	03/12/2018

#### Classificação do Pedido

Categoria do Pedido	Transportes e trânsito
Subcategoria do Pedido	Transporte ferroviário
Número de Perguntas	1

#### Histórico do Pedido

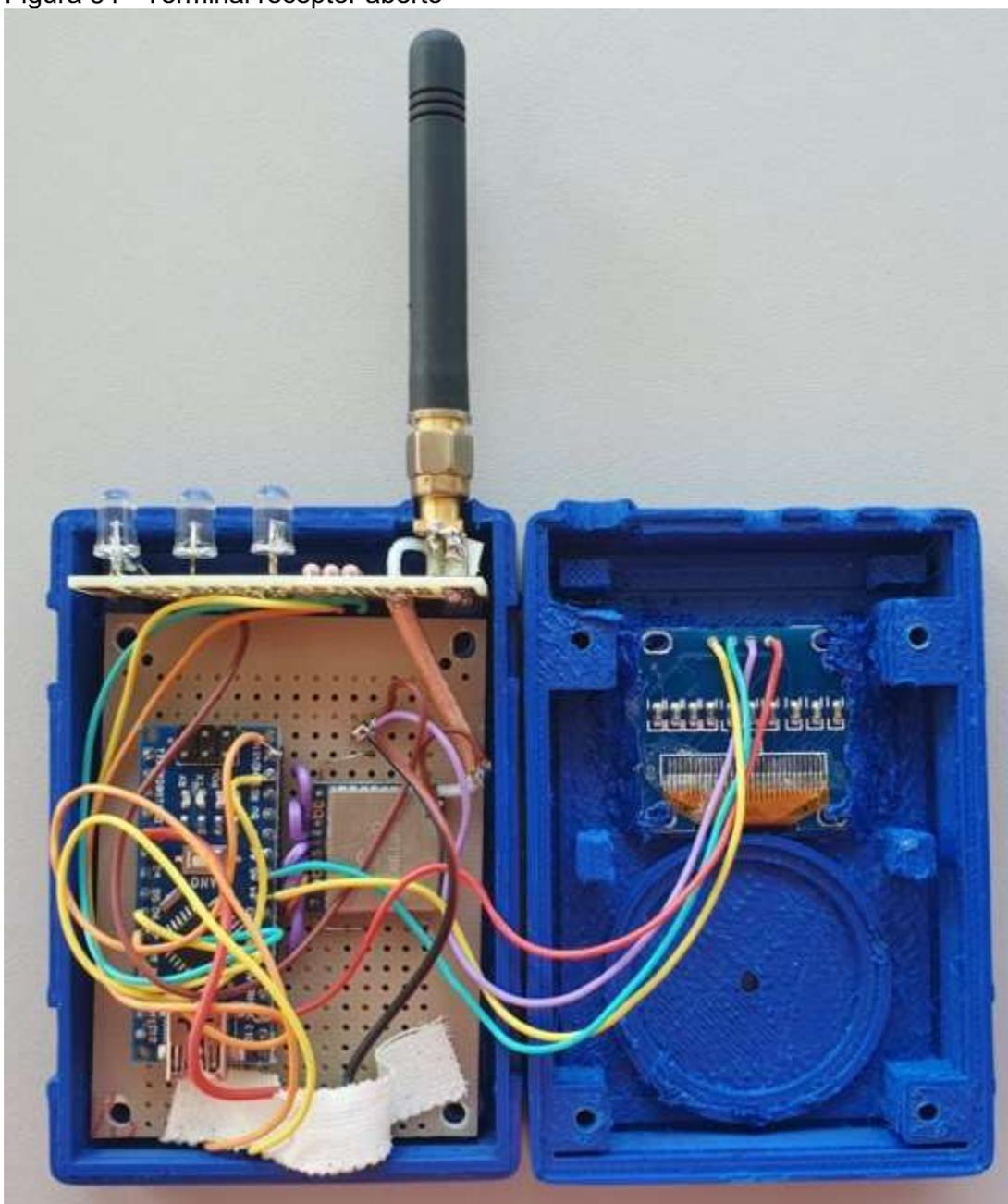
Data do evento	Descrição do evento	Responsável
01/11/2018 19:38	Pedido Registrado para para o Órgão ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres	SOLICITANTE
22/11/2018 11:43	Pedido Respondido	MTPA – Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil/ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres





Fonte: O autor

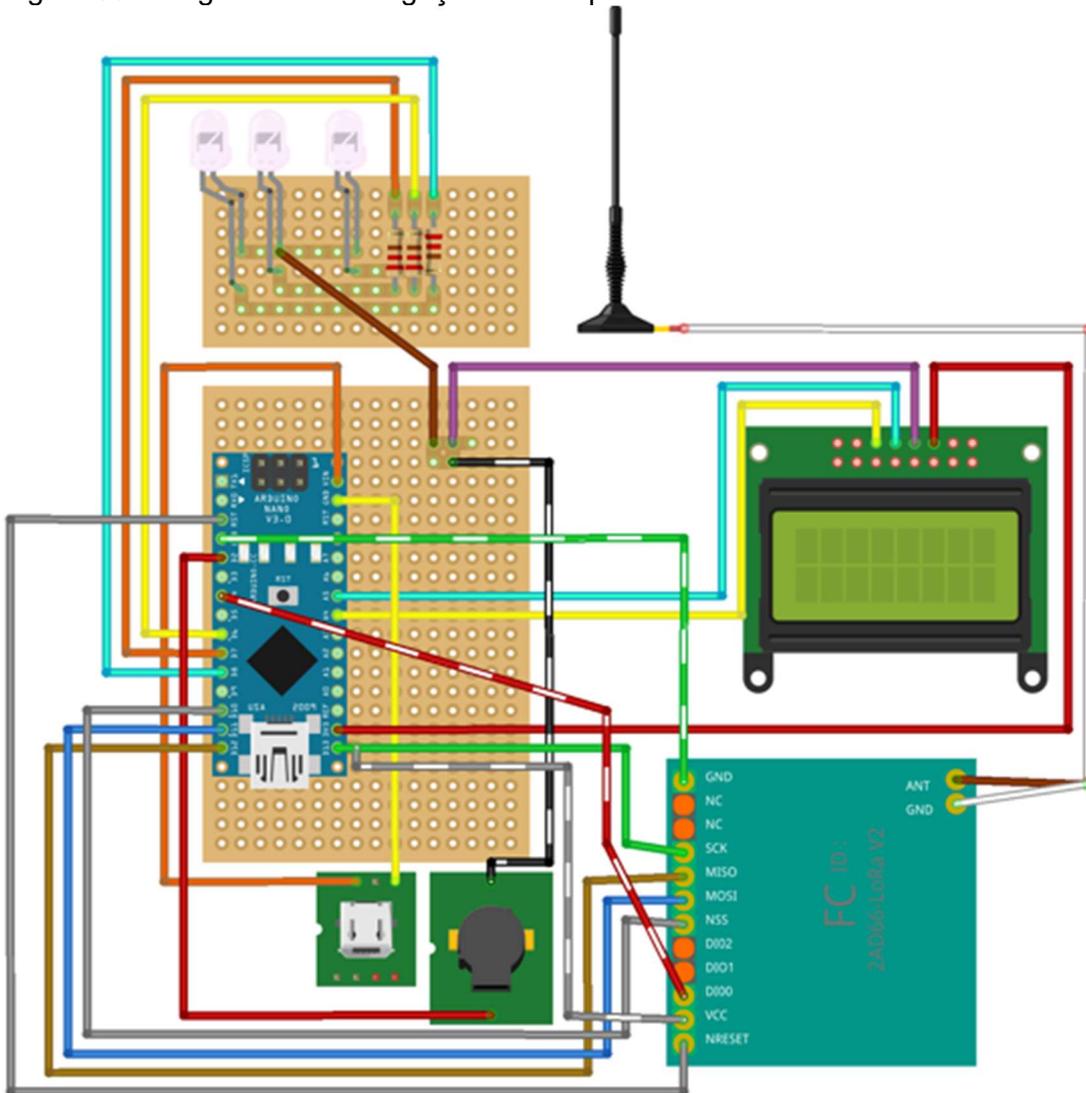
Figura 54 - Terminal receptor aberto



Fonte: O autor

Para o terminal receptor foi utilizado uma placa de circuito impresso já perfurada, para interligação dos componentes, e sua caixa foi construída em uma impressora 3D.

Figura 55 - Diagrama de interligação do receptor



Fonte: elaborado pelo autor

## Anexo C – Códigos fonte do Arduino

Códigos fonte que foram utilizados para os módulos Arduino Transmissor e Receptor.

Código fonte do transmissor:

```
// Pinagem LORA RA-01 ---- ARDUINO NANO

//3.3V ----- 3.3V
//GND ----- GND
//EN/NSS----- D10
//G0/DIO0----- D2
//SCK----- D13
//MISO----- D12
//MOSI----- D11
//RST----- D9

#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>

int counter = 0;
int counter1 = 0;
int msgCount = "0";

void setup() {
  Serial.begin(1200);
  while (!Serial);

  Serial.println("LoRa Sender");

  if (!LoRa.begin(915E6)) {
    Serial.println("Starting LoRa failed!");
    while (1);
  }
}

void(* resetFunc) (void) = 0;

void sendMessage(String outgoing) {
  LoRa.beginPacket();          // start packet
  LoRa.print(outgoing);        // add payload
  Serial.print(outgoing);
  LoRa.endPacket();            // finish packet and send it
  msgCount++;                  // increment message ID
}
```

```

void loop() {
  Serial.print("Sending packet: ");
  Serial.println(counter);
  String message = "901507"; // send a message
  // message += msgCount;
  sendMessage(message);

  msgCount++;
  // send packet
  // LoRa.beginPacket();
  // LoRa.print(msgCount);
  // LoRa.write(&msgCount);
  // Serial.print("mensagem enviada: ");
  // Serial.println(msgCount);
  // LoRa.print(counter);
  // LoRa.endPacket();
  //
  //
  // counter++;

  delay(500);
  resetFunc();
}

```

Código fonte do receptor:

```

// Pinagem LORA RA-01 ---- ARDUINO NANO

//3.3V ----- 3.3V
//GND ----- GND
//EN/NSS----- D10
//G0/DIO0----- D2
//SCK----- D13
//MISO----- D12
//MOSI----- D11
//RST----- D9

#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>
#include "U8glib.h"

U8GLIB_SSD1306_128X64 u8g(U8G_I2C_OPT_NO_ACK); // display oled
int texto1; // em uso
String texto2;

```

```

const int ledPin = 6;
const int ledPin1 = 7;
const int ledPin2 = 8;

const int pulso = 3;

float seno;
int frequencia;

volatile int MessageLength = 0;
//LoRa.setSignalBandwidth(7.8E3);

void setup() {

  pinMode(ledPin, OUTPUT);
  pinMode(ledPin1, OUTPUT);
  pinMode(ledPin2, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial);

  Serial.println("LoRa Receiver");

  if (!LoRa.begin(915E6)) {
    Serial.println("Starting LoRa failed!");
    while (1);
  }
}

void(* resetFunc) (void) = 0;
void draw(void) // rotina para mostrar informação no display oled
{
  //u8g.setFont(u8g_font_fub30);
  u8g.setFont(u8g_font_8x13B);
  u8g.drawStr( 10, 37, "RSSI =");
  u8g.setPrintPos(65, 37);
  u8g.print(texto1);
  u8g.drawStr( 90, 37, "dBm");
  u8g.drawStr( 10, 10, "ALERTOR");
  u8g.setPrintPos(5, 70);
  u8g.drawStr( 10, 57, "SN. =");
  u8g.setPrintPos(55, 57);
  u8g.print(texto2);
  //moldura relógio
  u8g.drawRFrame(0, 18, 128, 46, 4);
}

void freq_som() // rotina para tocar som
{
  for(int x=0;x<180;x++){
    //converte graus para radiando e depois obtém o valor do seno
    seno=(sin(x*3.1416/180));
    //gera uma frequência a partir do valor do seno

```

```

    frequencia = 2000+(int(seno*1000));
    tone(pulso,frequencia);
    delay(2);
  }
}

void loop()
{
  draw(); // figura loop
  u8g.firstPage();
  do {
    draw();
  }
  while( u8g.nextPage() );

  HandleInterrupt(MessageLength);
  // try to parse packet
  onReceive(LoRa.parsePacket());

  int packetSize = LoRa.parsePacket();
  if (packetSize) {
    // received a packet
    Serial.print("Received packet ");

    // read packet
    while (LoRa.available()) {
      Serial.print((String)LoRa.read());
      // texto2 = ((char)LoRa.read());
      // Serial.print("Pacote ' ");
      // Serial.println(LoRa.parsePacket());
    }

    // print RSSI of packet
    Serial.print(" RSSI = ");
    Serial.println(LoRa.packetRssi());

    // texto1 = (LoRa.packetRssi()*-1);
    Serial.print(" SNR = ");
    Serial.println(LoRa.packetSnr());

    delay(2000);

  }

  else
  {
    Serial.print("");
  }
}

```

```

void HandleInterrupt(int packetSize)
{
  String Message = "Rcvd: ";
  for (int i = 0; i < packetSize; i++)
    Message = Message + (String)LoRa.read();
  Message = Message + " RSSI: " + LoRa.packetRssi(); // print RSSI of packet
  Serial.println(Message);
  digitalWrite(ledPin, LOW);
  digitalWrite(ledPin1, LOW);
  digitalWrite(ledPin2, LOW);
  noTone(pulso);
  noTone(freq_som);
}

// procedimento para receber a mensagem da numeração TX da locomotiva
void onReceive(int packetSize) {
  MessageLength = packetSize;
  if (packetSize == 0) return;
  byte incomingMsgId = LoRa.read();// if there's no packet, return
  Serial.print("test:" + int(LoRa.read()));
  // read packet header bytes:
  String incoming = "";
  //resetFunc();

  while (LoRa.available()) {
    incoming += (String)LoRa.read();
    Serial.println((int)LoRa.read());
    texto2 = incoming;
  }
  Serial.println("Message: " + incoming);
  Serial.println("ID da mensagem: " + String(incomingMsgId));
  // texto2 = incoming;

  Serial.print("test:" + int(LoRa.read()));
  Serial.println("RSSI: " + String(LoRa.packetRssi()));
  texto1 = (LoRa.packetRssi()*-1);
  Serial.println("Snr: " + String(LoRa.packetSnr()));
  Serial.println();

  int text1 = (LoRa.packetRssi()*-1);

  if ((text1 >= 10) and (text1 < 70))
    {
      Serial.println(" -10 a -70 ");
      digitalWrite(ledPin, HIGH);
      digitalWrite(ledPin1, HIGH);
      digitalWrite(ledPin2, HIGH);
    }
}

```

```
digitalWrite(pulso, HIGH);
freq_som();
}
else
if ((text1 >= 70) and (text1 < 90))
{
  Serial.println(" -70 a -90 ");
  digitalWrite(ledPin, LOW);
  digitalWrite(ledPin1, HIGH);
  digitalWrite(ledPin2, HIGH);

  freq_som();
}
else
if ((text1 >= 90) and (text1 < 120))
{
  Serial.println(" -90 a -120 ");
  digitalWrite(ledPin, LOW);
  digitalWrite(ledPin1, LOW);
  digitalWrite(ledPin2, HIGH);

  freq_som();
}
if (!LoRa.parsePacket())
{
  digitalWrite(ledPin, LOW);
  digitalWrite(ledPin1, LOW);
  digitalWrite(ledPin2, LOW);
  noTone(pulso);
  noTone(freq_som);

}
}
```

### Anexo D – Tabela das medidas de campo em Louveira e Serra do Mar

Tabela apresentando as coordenadas, nível de intensidade do sinal e distância entre o ponto coletado e a estação transmissora na região de Louveira e da Serra do Mar no Estado de São Paulo.

Tabela com a coleta do sinal - Serra do Mar			
Latitude	Longitude	Distância para Tx	Valor medido dBm
-23.955892	-46.54622	1795	-112
-23.955942	-46.546363	1780	-112
-23.955992	-46.546505	1764	-112
-23.956042	-46.546647	1749	-112
-23.956075	-46.54674	1739	-112
-23.956125	-46.54688	1723	-112
-23.956175	-46.54702	1708	-112
-23.956225	-46.547158	1693	-112
-23.956258	-46.547252	1683	-112
-23.956308	-46.547392	1668	-112
-23.95636	-46.547533	1652	-112
-23.956417	-46.547675	1637	-105.2
-23.956478	-46.547815	1621	-105.2
-23.956527	-46.547908	1610	-99.4
-23.956595	-46.548042	1594	-100.4
-23.95666	-46.548163	1580	-100.4
-23.956737	-46.548295	1564	-100.4
-23.956807	-46.548423	1549	-100.4
-23.956847	-46.548505	1540	-100.4
-23.956893	-46.54862	1527	-96.6
-23.956962	-46.548753	1511	-96.6
-23.95702	-46.548893	1496	-99.1
-23.957067	-46.549033	1481	-99.1
-23.957095	-46.549118	1471	-99.1
-23.957138	-46.549265	1456	-99.1
-23.957177	-46.549407	1441	-98.3
-23.957215	-46.54956	1425	-98.3
-23.957243	-46.54966	1414	-98.3
-23.95728	-46.549813	1399	-98.3
-23.957318	-46.549975	1382	-107.1

Tabela com a coleta do sinal - Louveira			
Latitude	Longitude	Distância para Tx	Valor medido dBm
-23.07562	-46.94706	380	-115
-23.07568	-46.94712	370	-110.6
-23.07574	-46.94718	360	-110.2
-23.0758	-46.94724	360	-110.3
-23.07586	-46.9473	350	-108.9
-23.07591	-46.94736	340	-108.7
-23.07597	-46.94742	330	-108.7
-23.07605	-46.94749	320	-105.7
-23.07613	-46.94757	310	-102.7
-23.07623	-46.94765	300	-100
-23.07633	-46.94772	280	-86.4
-23.07644	-46.94778	270	-82.8
-23.07655	-46.94785	260	-79.3
-23.07665	-46.94791	250	-78.5
-23.07677	-46.94796	230	-79.4
-23.07687	-46.94802	220	-78
-23.07698	-46.94807	210	-77.5
-23.07714	-46.94814	190	-77
-23.07727	-46.94818	170	-76.7
-23.0774	-46.94823	160	-75.8
-23.07753	-46.94827	140	-73
-23.07768	-46.94829	130	-62.5
-23.0778	-46.94831	110	-61.3
-23.07793	-46.94834	100	-59.4
-23.07806	-46.94836	80	-53.9
-23.0782	-46.94838	70	-53
-23.07835	-46.9484	50	-50.1
-23.07851	-46.94844	30	-41.7
-23.07865	-46.94845	20	-39.5
-23.07882	-46.94843	0	-33

-23.957357	-46.550133	1365	-107.1
-23.957395	-46.5503	1347	-107.1
-23.95742	-46.550408	1336	-108.9
-23.957463	-46.550567	1319	-108.9
-23.95752	-46.550717	1303	-103.4
-23.957597	-46.550862	1286	-103.4
-23.957682	-46.551033	1266	-101
-23.957742	-46.551143	1253	-100.5
-23.957832	-46.551297	1235	-100.5
-23.957923	-46.551458	1215	-97.4
-23.95802	-46.551623	1195	-97.4
-23.958122	-46.551795	1175	-97.4
-23.958183	-46.551913	1161	-97.4
-23.958265	-46.5521	1140	-97.4
-23.95833	-46.552283	1120	-98.3
-23.958378	-46.552473	1100	-111.3
-23.958408	-46.552665	1080	-111.3
-23.958432	-46.552797	1066	-111.3
-23.958442	-46.552997	1046	-111.3
-23.958447	-46.553232	1022	-100
-23.95845	-46.553448	1000	-100
-23.958455	-46.553673	977	-100
-23.958465	-46.553893	955	-100
-23.958473	-46.554037	940	-106.6
-23.958498	-46.554262	917	-106.6
-23.958527	-46.554483	895	-102.8
-23.958567	-46.554675	875	-102.8
-23.958605	-46.554812	860	-102.8
-23.958672	-46.554995	840	-102.8
-23.958745	-46.555188	819	-86.3
-23.95883	-46.555373	798	-86.3
-23.958912	-46.555507	782	-86.3
-23.958965	-46.555593	771	-90.2
-23.959065	-46.555723	754	-90.2
-23.95916	-46.555838	738	-90.2
-23.959248	-46.555947	723	-83.3
-23.959342	-46.556055	708	-83.3
-23.959405	-46.556128	698	-83.3
-23.959495	-46.556208	685	-83.3
-23.959585	-46.55628	673	-84.5
-23.959677	-46.556363	660	-93.4

-23.07898	-46.94847	-20	-43.1
-23.07908	-46.94848	-30	-45.4
-23.07918	-46.94849	-40	-45.9
-23.07925	-46.9485	-50	-50.1
-23.07933	-46.94851	-60	-49.9
-23.07941	-46.94851	-70	-58.4
-23.0795	-46.94852	-80	-58.9
-23.07958	-46.94853	-90	-61.6
-23.07965	-46.94854	-100	-64.2
-23.07981	-46.94856	-110	-68.6
-23.07987	-46.94856	-120	-70.4
-23.07994	-46.94857	-130	-73.1
-23.08002	-46.94859	-140	-74.7
-23.08015	-46.9486	-150	-75.7
-23.08022	-46.9486	-160	-76.3
-23.08028	-46.94862	-170	-77
-23.08041	-46.94863	-180	-77.9
-23.08047	-46.94864	-190	-80
-23.08058	-46.94864	-200	-80.4
-23.08064	-46.94865	-210	-81
-23.08076	-46.94865	-220	-81.4
-23.08082	-46.94866	-230	-81.3
-23.08108	-46.94868	-250	-81.6
-23.08114	-46.94869	-260	-82
-23.08121	-46.94869	-270	-82.4
-23.08128	-46.9487	-280	-83.6
-23.08144	-46.94872	-290	-84
-23.08152	-46.94873	-300	-85.3
-23.0816	-46.94873	-310	-85.9
-23.08168	-46.94874	-320	-86.8
-23.08176	-46.94875	-330	-86.9
-23.08185	-46.94876	-340	-87.6
-23.08193	-46.94877	-350	-88.8
-23.08201	-46.94878	-360	-93
-23.08212	-46.94879	-370	-95.2
-23.08221	-46.9488	-380	-95.5
-23.0823	-46.9488	-390	-95.9
-23.08242	-46.94881	-400	-96
-23.08253	-46.94882	-420	-97.3
-23.08263	-46.94883	-430	-97.7
-23.08274	-46.94884	-440	-98

-23.95977	-46.556443	646	-93.4
-23.959837	-46.556505	637	-93.4
-23.959937	-46.556593	628	-93.4
-23.960035	-46.556678	614	-93.4
-23.960138	-46.556767	599	-98.3
-23.960242	-46.556847	585	-98.3
-23.960307	-46.556907	576	-98.3
-23.960415	-46.557008	560	-98.3
-23.960517	-46.557142	542	-98.3
-23.960638	-46.557247	525	-98.3
-23.960727	-46.557305	514	-98.3
-23.960855	-46.557392	497	-98.3
-23.960977	-46.55751	479	-89.3
-23.961095	-46.55765	459	-89.3
-23.9612	-46.557805	440	-91.3
-23.961263	-46.557913	427	-91.3
-23.961355	-46.558082	407	-91.3
-23.961438	-46.55826	387	-81.5
-23.961518	-46.558445	366	-90.4
-23.961587	-46.558633	345	-90.4
-23.961627	-46.558742	333	-67.1
-23.961678	-46.558942	312	-67.1
-23.961732	-46.55915	290	-67.1
-23.961753	-46.55936	269	-70.1
-23.96177	-46.559563	248	-70.1
-23.961788	-46.559757	228	-70.1
-23.961807	-46.5599	214	-70.1
-23.961845	-46.560093	194	-70.1
-23.961873	-46.560278	175	-73.6
-23.961912	-46.56049	153	-73.6
-23.961943	-46.560608	140	-56.7
-23.962005	-46.560778	122	-56.7
-23.96207	-46.560908	107	-56.7
-23.962153	-46.561132	82	-47.7
-23.96223	-46.561358	58	-47.7
-23.962278	-46.56149	43	-47.7
-23.962352	-46.561672	23	-47.7
-23.962423	-46.561885	0	-33.3

-23.08285	-46.94885	-450	-98
-23.08298	-46.94886	-470	-98.1
-23.08312	-46.94888	-480	-98.3
-23.08326	-46.94889	-500	-98.4
-23.08339	-46.9489	-510	-98.3
-23.08356	-46.94892	-530	-98.5
-23.08379	-46.94894	-560	-98.9
-23.08395	-46.94896	-580	-99.7
-23.08414	-46.94898	-600	-100.3
-23.08436	-46.94901	-620	-102

Z Test - duas amostras - Louveira		
<i>Região de Louveira</i>	<i>Medido</i>	<i>Predito</i>
Mean	-81.09753086	-78.404938
Known Variance	373	370
Observations	81	81
Hypothesized Mean Difference	0	
z	-0.889034776	
P(Z<=z) one-tail	0.186992195	
z Critical one-tail	1.644853627	
P(Z<=z) two-tail	0.373984391	
z Critical two-tail	1.959963985	

-23.962492	-46.562028	-17	-33.3
-23.96257	-46.562177	-35	-33.3
-23.96263	-46.562337	-46	-33.3
-23.962672	-46.562433	-63	-33.3
-23.96275	-46.562583	-82	-33.3
-23.962823	-46.562747	-101	-47.4
-23.962905	-46.562913	-114	-47.4
-23.962955	-46.563033	-134	-47.4
-23.963022	-46.563213	-153	-47.4
-23.963063	-46.563393	-177	-37.9
-23.963105	-46.563627	-191	-37.9
-23.963125	-46.563765	-209	-37.9
-23.963147	-46.563933	-226	-37.9
-23.963167	-46.564105	-244	-37.9
-23.963212	-46.564277	-263	-53.5
-23.963238	-46.564457	-277	-53.5
-23.963265	-46.564597	-297	-53.5
-23.963298	-46.564783	-312	-53.5
-23.963342	-46.564923	-331	-59
-23.963395	-46.565103	-351	-65.1
-23.96346	-46.565293	-368	-65.1
-23.963515	-46.565442	-389	-65.1
-23.963625	-46.565618	-414	-65.1
-23.963737	-46.565832	-437	-94.7
-23.963855	-46.566015	-459	-85.8
-23.963982	-46.566182	-477	-85.7
-23.964067	-46.56633	-501	-85.7
-23.964187	-46.566528	-522	-85.7
-23.964295	-46.566695	-543	-85.7
-23.96439	-46.566878	-564	-85.7
-23.964467	-46.567067	-577	-85.7
-23.964512	-46.567187	-598	-85.4
-23.964572	-46.567383	-617	-85.4
-23.96462	-46.567558	-636	-85.4
-23.964633	-46.567743	-650	-88.1
-23.964647	-46.567885	-674	-88.1
-23.964687	-46.568115	-698	-88.1
-23.964738	-46.568348	-723	-83.3
-23.964785	-46.568587	-747	-83.3
-23.964855	-46.568807	-771	-84.9
-23.964947	-46.569023	-786	-84.9
-23.965005	-46.569158	-809	-84.9
-23.965105	-46.569353	-830	-84.9

-23.965228	-46.569518	-853	-94.2
-23.965367	-46.569678	-877	-100
-23.965528	-46.56984	-891	-100
-23.965638	-46.569907	-914	-100
-23.96582	-46.570005	-938	-100
-23.966013	-46.570122	-962	-100.6
-23.966208	-46.570215	-985	-102.9
-23.966395	-46.570325	-1001	-102.9
-23.966518	-46.570402	-1026	-102.9
-23.966708	-46.57053	-1049	-102.9
-23.96688	-46.570668	-1072	-102.9
-23.96704	-46.570807	-1089	-102.9
-23.967145	-46.570923	-1113	-102.9
-23.967293	-46.571097	-1137	-102.9
-23.96744	-46.571275	-1161	-109.6
-23.967568	-46.571468	-1177	-110.2

z-Test: duas amostras - Serra do Mar		
<i>Serra do Mar</i>	<i>Medido</i>	<i>Previsto</i>
Mean	-84.88928571	-81.62619
Known Variance	455	493
Observations	168	168
Hypothesized Mean Di	0	
z	-1.373663067	
P(Z<=z) one-tail	0.084773154	
z Critical one-tail	1.644853627	
P(Z<=z) two-tail	0.169546308	
z Critical two-tail	1.959963985	