



INSTITUTO TECNOLÓGICO VALE



**Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e
Automação de Processos de Mineração (PROFICAM)
Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)
Associação Instituto Tecnológico Vale (ITV)**

Dissertação

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA DE ANÁLISE DE QUALIDADE DE
REDE SEM FIO PARA VEÍCULOS NÃO TRIPULADOS EM MINA A CÉU ABERTO**

Gabriel Guieiro

**Ouro Preto
Minas Gerais, Brasil
2019**

Gabriel Guieiro

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA DE ANÁLISE DE QUALIDADE DE REDE SEM FIO PARA VEÍCULOS NÃO TRIPULADOS EM MINA A CÉU ABERTO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração da Universidade Federal de Ouro Preto e do Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Gustavo Medeiros Freitas, D.Sc.

Coorientador: Prof. Luis Guilherme Uzeda Garcia, Ph.D

Ouro Preto
2019

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G949d Guieiro, Gabriel Arthur .
Desenvolvimento de ferramenta de análise de qualidade de rede sem fio para veículos não tripulados em mina a céu aberto. [manuscrito] / Gabriel Arthur Guieiro. - 2019.

78 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Freitas.

Coorientador: Prof. Dr. Luis Uzeda.

Dissertação (Mestrado Profissional). Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração. Programa de Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração.

Área de Concentração: Engenharia de Controle e Automação de Processos Mineraiis.

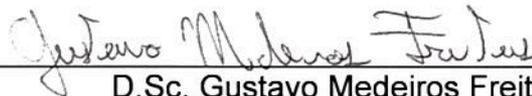
1. Redes locais sem fio. 2. Equipamento de transporte - Controle automático. 5. Indicador de intensidade do sinal recebido -(RSSI). 6. Protocolo de aplicação sem fio (Protocolo de rede de computador) - SNMP. 7. Transmissão - Densidade de potência (Path Loss). I. Guieiro, Gabriel Arthur . II. Freitas, Gustavo. III. Uzeda, Luis. IV. Universidade Federal de Ouro Preto. V. Título. CDU 681.5:622.2

Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos
de Mineração - PROFICAM

Desenvolvimento de Ferramenta de Análise de Qualidade de Rede Sem Fio
para Veículos não Tripulados em Mina a Céu Aberto

Gabriel Arthur Guieiro

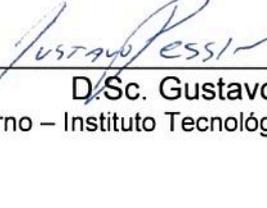
Dissertação defendida e aprovada em 26 de agosto de 2019 pela banca
examinadora constituída pelos professores:



D.Sc. Gustavo Medeiros Freitas
Orientador – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

Ph.D. Luis Guilherme Uzeda Garcia
Participação por videoconferência
Coorientador – Bell Labs

D.Sc. Robson Domingues Vieira
Membro externo – Ektrum



D.Sc. Gustavo Pessin
Membro interno – Instituto Tecnológico Vale Mineração (ITV-MI)

*Aos meus amigos, família e
colegas, que são pessoas incríveis.*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus orientadores, Gustavo Medeiros e Luis Uzeda, que além de me guiarem tecnicamente, conviveram compreensivamente com minha escassez de tempo na elaboração deste trabalho.

Sou grato também à equipe do Projeto da Mina Autônoma, principalmente ao Emerson Balbino, que me depositou confiança, formou um time vencedor e que materializou, de forma pioneira, os primeiros caminhões fora de estrada autônomos do Brasil.

À Vale, por me proporcionar ambiente de trabalho estimulante e incentivar genuinamente a inovação em suas operações.

Resumo

Resumo da Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA DE ANÁLISE DE QUALIDADE DE REDE SEM FIO PARA VEÍCULOS NÃO TRIPULADOS EM MINA A CÉU ABERTO

Gabriel Guieiro

Agosto/2019

Orientadores: Gustavo Medeiros Freitas

Luis Guilherme Uzeda Garcia

O ambiente de mina a céu aberto, tradicionalmente conservador quanto à adoção de novas tecnologias, vive intensa modernização de suas atividades. Dentre as inovações destaca-se a massificação do uso de equipamentos não tripulados principalmente na exploração de minério de ferro. Nos últimos anos, a Vale ampliou o uso dos equipamentos não tripulados - até então limitados às perfuratrizes autônomas e aos tratores teleoperados - com a criação do programa de transporte autônomo, onde caminhões não tripulados operam sem intervenção humana, sob comando de aplicação remota, guiados por sistema de georreferenciamento de alta precisão e que trocam dados via rede de comunicação sem fio. Redes sem fio que atendem às aplicações desta natureza possuem altos requisitos de confiabilidade e demandam uma gestão robusta e eficiente. As tarefas de projetar, implementar e manter uma rede que atenda aos requisitos em um ambiente de mina a céu aberto guarda desafios, pois a topografia é artificialmente modificada a todo tempo, gerando potenciais falhas de comunicação devido à indisponibilidade de cobertura. Neste contexto, faz-se necessário o uso de ferramentas e práticas pelas equipes de gestão e manutenção das redes sem fio, como a realização de constantes *site surveys*. Este trabalho propõe a criação de ferramenta que automatize a geração desta atividade, considerada laboriosa e de necessidade recorrente devido ao ambiente de constantes mudanças. Os dados provenientes dos diversos *site surveys* automatizados permitem o cumprimento dos demais objetivos do trabalho: validar o modelo Vale de propagação, utilizado no software MininWIO além de gerar base de dados de características georreferenciadas das operações autônomas da Vale, que alimentará aplicações futuras.

Palavras-chave: Redes sem fio, equipamentos não tripulados, caminhão autônomo, validação de modelo Vale de Propagação, RSSI, SNMP, *Path Loss* palavra1, palavra2, palavra3.

Macrotema: Tecnologia da Informação, Comunicação e Automação Industrial; **Linha de Pesquisa:** Desempenho de rede sem fio para equipamentos não tripulados; **Tema:** Telecomunicações em ambiente de mina de ferro a céu aberto; **Área Relacionada da Vale:** Programa Mina Autônoma.

Abstract

Abstract of Dissertation presented to the Graduate Program on Instrumentation, Control and Automation of Mining Process as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

DEVELOPMENT OF QUALITY ANALYSIS TOOL FOR UNMANNED EQUIPMENTS WIRELESS NETWORK IN OPEN-PIT MINE

Gabriel Guieiro

August/2019

Advisors: Gustavo Medeiros Freitas

Luis Guilherme Uzeda Garcia

The open pit environment, traditionally conservative regarding the adoption of new technologies, is undergoing intense modernization of its activities. Among the innovations is the recent increased application of unmanned equipment mainly in the exploitation of iron ore. In the last years, Vale has expanded the use of unmanned equipment - previously limited to autonomous drills and teleoperated dozers - with the creation of an autonomous transportation program, where unmanned haul trucks operate without human intervention, under remote application command, guided by a high-precision GNSS system and exchange data using wireless communication network. Wireless networks that support applications of this kind require high reliability and demand robust and efficient management. The tasks of designing, deploying, and maintaining a network that meets the requirements in an open pit environment is challenging as the topography is artificially modified constantly, generating potential signal losses due to unavailability of coverage. In this context it is necessary the use of tools and practices by wireless networks maintenance teams, such as the constant measurement using site survey procedures. This work proposes a tool that automates the site surveys, a task that is considered laborious and with recurrent necessity due to the environment that changes constantly. The data from the various automated site surveys allow the achievement of others work's objectives: validation of the Vale model of propagation, applied in MininWIO software, besides generating a database of georeferenced characteristics of Vale's autonomous operations, which will feed future applications.

Keywords: Wireless Network, Autonomous Equipments, Autonomous Truck, Vale Propagation Model Validation, RSSI, SNMP, *Path Loss*.

Macrotheme: Information Technology, Communication and Industrial Automation; **Research Line:** Wireless performance for non-manned equipment; **Theme:** Iron ore open pit mines telecommunication; **Related Area of Vale:** Autonomous Mine Program.

Lista de Figuras

Figura 1.1	Ganhos médios considerados em uma típica implantação de sistema de caminhões autônomos Gölbaşı e Dagdelen (2017).	16
Figura 1.2	Mina virtualizada; acessos e praças de carga e basculamento são mapeadas no ambiente físico e representadas no sistema de operação remoto.	17
Figura 1.3	Diagrama do AHS - Caminhão e seus subsistemas, <i>Data Center</i> e <i>Command Center</i>	18
Figura 1.4	A presença de animais dentro da área de operação não é incomum e exige frenagem de emergência dos equipamentos autônomos.	19
Figura 1.5	Histórico da frota mundial de caminhões autônomos e seu crescimento expressivo (157%) a partir de 2018.	21
Figura 1.6	Perfil das perdas de disponibilidade física entre janeiro de 2018 e novembro de 2018.	22
Figura 1.7	Perdas de sinal de comunicação da rede sem fio do caminhão autônomo representada por bolhas - cada uma significa uma ocorrência. O tamanho das bolhas representa o tempo de duração do erro.)	23
Figura 1.8	Infograma do processo; dados são obtidos dos equipamentos e alimentam ferramenta gráfica.	25
Figura 2.1	Características dos padrões da camada física 802.11 quanto às frequências e banda Sauter (2011)	30
Figura 2.2	Topologia típica de uma rede Mesh. As conexões, em vermelho, são estabelecidas entre os nós de rede de forma dinâmica.	32
Figura 2.3	WiMAX na estrutura OSI Pareit <i>et al.</i> (2012)	34
Figura 2.4	Arquitetura de rede WiMAX. Etemad (2008)	35
Figura 2.5	Representação em infográfico da Internet das Coisas no ambiente da mineração: a existência de “camada” dedicada a representação das redes sem fio demonstram sua importância no contexto. J. Lee e K. Prowse (2014)	38
Figura 2.6	Diagrama dos campos elétricos (E) e magnéticos (H) emitidos por uma antena monopolo Stuart Ballantine (1922).	39
Figura 2.7	Principais mecanismos de degradação de sinal: Grande e Pequena Escala Golam Sadeque <i>et al.</i> (2015).	40

Figura 2.8	Estrutura Analítica dos componentes de um REM Denkovski <i>et al.</i> (2012).	43
Figura 2.9	Esquema do princípio de funcionamento do protocolo SNMP.	45
Figura 3.1	Evolução do número de equipamentos que vão demandar a rede de forma crítica em Brucutu.	47
Figura 3.2	Requisitos de rede para as aplicações de tecnologia utilizadas na Vale.	48
Figura 3.3	Topologia de rede existente na Mina de Brucutu (Maio, 2018).	48
Figura 3.4	Etapas 1 a 5 do desenvolvimento do trabalho; da aquisição de dados à geração de informações para tomada de decisão.	49
Figura 3.5	O servidor SNMP é apontado no cliente.	51
Figura 3.6	É necessário definir as <i>communities</i> de acesso.	51
Figura 3.7	MIB Browser com os as variáveis de RSSI e CINR disponíveis para leitura.	52
Figura 3.8	Valores lidos via SNMP são confrontados com os valores fornecidos pelo rádio.	53
Figura 3.9	Coletor de pacotes SNMP configurado para buscar a cada 2 segundos dado de RSSI.	54
Figura 3.10	Resultados “crus” da saída do coletor; pacote SNMP em resposta a um <i>GET</i> de OID de RSSI.	54
Figura 3.11	Dados de posicionamento do sistema de caminhões autônomos - coordenadas no formato UTM.	55
Figura 3.12	Infraestrutura responsável pela obtenção, tratamento e alguns usos dos dados de GNSS no sistema AHS.	56
Figura 3.13	Relatório de configuração da base de correção: configuração de erro mínimo de 0.01 metro	56
Figura 3.14	Relatório de precisão do sistema autônomo: erros de até 1.07 metros no sistema GNSS convencional tornam o sistema de correção necessário.	57
Figura 3.15	Antenas foram colocadas sobrepostas para que as coordenadas fossem comparada.	58
Figura 3.16	O coletor realiza medidas e exibe os dados convertidos em diversos formatos de coordenadas.	58
Figura 3.17	Janela para seleção dos arquivos de entrada.	59
Figura 3.18	Tela Principal da Ferramenta exibindo gráfico de RSSI com todos os dados válidos.	61
Figura 4.1	Resultado do <i>site survey</i> no intervalo entre 11:30 e 11:50. A escala de cores representa valores de dBm, mostrados nos rótulos de dados na própria imagem.	63
Figura 4.2	Resultado do <i>site survey</i> no intervalo entre 11:30 e 11:50. A escala representa valores de dBm.	64

Figura 4.3	Site survey contendo informações referentes a qual célula o cliente estava conectado no momento; cada letra representa uma célula da rede mesh. A funcionalidade de representar a atual conexão foi adicionada sob demanda.	64
Figura 4.4	Resultado da Predição para o WiMAX em Brucutu.	65
Figura 4.5	Detalhe da predição: destaque corresponde à região onde se esperava diminuição de qualidade. Marcação em estrela denota ponto onde está instalada a torre de transmissão.	66
Figura 4.6	Valores de RMSE para vários modelos de perda de propagação. Brucutu é identificado como <i>Mine 2</i>	66
Figura 4.7	Diferença, em <i>dB</i> , entre valores calculados pelo “modelo Vale e os medidos em campo. Estão representadas todas as rotas de todos os equipamentos.	67
Figura 4.8	A altura de instalação de cada antena varia com o equipamento e esse parâmetro alimenta o modelo Vale.	68
Figura 4.9	Percurso do caminhão durante a coleta de dados.	69
Figura 4.10	Aderência dos modelos Vale e FSPL à medição.	69
Figura 4.11	Percurso da motoniveladora durante a coleta de dados.	69
Figura 4.12	Aderência dos modelos Vale e FSPL à medição.	69
Figura 4.13	Percurso da camionete durante a coleta de dados.	70
Figura 4.14	Aderência dos modelos Vale e FSPL à medição.	70

Lista de Símbolos

- AHS** Autonomous Haul System
- ASN** Access Service Network
- BER** Bit Error Rate
- CINR** Carrier to Interference plus Noise Ratio
- CSN** Conectivity System Network
- DTM** Digital Terrain Model
- FSK** Frequency Shift Keying
- FSPL** Free Space Path Loss
- GNSS** Global Navigation Satellite System
- GPS** Global Positioning System
- GSMA** Global System for Mobile Communication Association
- HART** Highway Addressable Remote Transdutor
- IDW** Inverse Distance Weight
- INDT** Instituto de Desenvolvimento Tecnológico
- IP** Internet Protocol
- ITV** Instituto Tecnológico Vale
- LOS** Line Of Sight
- M2M** Machine to Machine
- MIB** Management Infomation Base

MS Mobile Station

NLOS Non-Line Of Sight

OID Object Identifier

OSI Open System Interconnection

QAM Quadrature Amplitude Modulation

RMSE Root Mean Square Error

ROM Run of Mine

RSSI Received Signal Strength Indicator

RTK Real Time Kinematic

SAD69 South America Datum 1969

SNMP Simple Network Management Protocol

SNR Signal Noise Ratio

SPM Standard Propagation Model

TDD Time Division Duplex

TDMA Time Division Multiple Access

UTM Universal Transverse Mercator

VANT Veículo Aéreo Não Tripulado

VBA Visual Basic for Applications

Sumário

Figura 1	Introdução	16
Figura 1.1	Objetivos	24
Figura 1.2	Organização do Trabalho	25
Figura 2	Revisão Bibliográfica	27
Figura 2.1	Redes sem fio na indústria mineral	27
Figura 2.1.1	Redes de Espectro Não Licenciado	28
Figura 2.1.2	Redes de Espectro Licenciado	33
Figura 2.1.3	Futuro das Redes de Comunicação sem Fio no Ambiente da Mineração a céu aberto	37
Figura 2.2	Modelagem e Predição	39
Figura 2.2.1	Técnicas de Modelagem de um Canal de Propagação	39
Figura 2.2.2	Modelos de Interesse	41
Figura 2.3	Radio Environment Map	42
Figura 2.4	Protocolo SNMP	45
Figura 2.5	Ferramentas Similares	46
Figura 3	Metodologia Proposta	47
Figura 3.1	Método para Obtenção e Validação dos Dados	51
Figura 3.1.1	Etapa I.1 - Obtenção de Dados da Rede	51
Figura 3.1.2	Etapa I.2 - Validação dos Dados da Rede	53
Figura 3.1.3	Etapa II.1 - Obtenção de Dados de Posicionamento	54
Figura 3.1.4	Etapa II.2 - Validação dos Dados de Posicionamento	55
Figura 3.1.5	Etapa III - Correlação e Armazenamento	59
Figura 4	Resultados e Discussões	62
Figura 4.1	Etapa 4 - Utilização dos dados para tomada de decisão	62
Figura 4.1.1	Etapa 4.1 - <i>Site Survey</i>	62
Figura 4.1.2	Etapa 4.2 - Validação do Modelo Vale de Propagação	65

Figura 5 Conclusões	71
Figura 5.1 Contribuições da Dissertação	72
Figura 5.2 Trabalhos Futuros	73
Referências Bibliográficas	74

1. Introdução

A crescente demanda por competitividade no mercado de *commodities* faz com que as empresas do ramo busquem formas de tornar as operações mais eficientes. O setor de extração e beneficiamento mineral participou de todas as etapas das revoluções industriais, que iniciaram com a introdução da força motriz a vapor, no fim do século 18, encontrou na metodologia de divisão do trabalho, ao fim do século 20, o pivô da segunda revolução industrial e, já na década de 1970, a terceira revolução foi pautada pela introdução dos controladores lógicos programáveis (CLP) Kagermann *et al.* (2013). De acordo com Brettel *et al.* (2014), a quarta revolução industrial é desencadeada por redes de alta capacidade, que permitem que humanos e máquinas se comuniquem em sistemas ciber-físicos de forma a criar um ambiente produtivo integrado. Em consonância com o processo de incorporação de redes de alta capacidade no meio produtivo, as empresas do setor de mineração de ferro, atividade relevante na composição do produto interno bruto de países como Austrália e Brasil, têm adotado a utilização de equipamentos autônomos de grande porte Gölbaşı e Dagdelen (2017). Ganhos expressivos em toda a cadeia de extração, quantificados na Figura 1.1, têm sido reportados pelas empresas do setor.

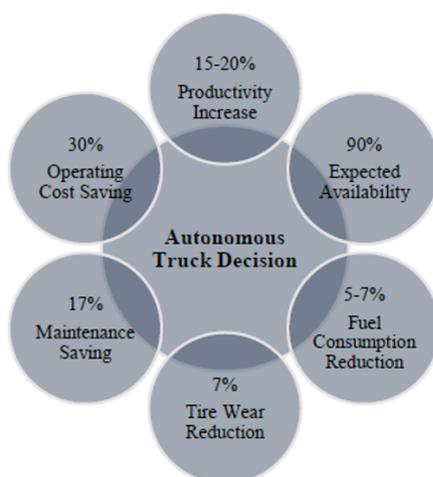


Figura 1.1: Ganhos médios considerados em uma típica implantação de sistema de caminhões autônomos Gölbaşı e Dagdelen (2017).

Diversos fabricantes têm trabalhado no desenvolvimento de tecnologias de equipamentos autônomos para a indústria de mineração Hyder *et al.* (2018). Equipamentos autônomos possuem a capacidade de operar sem intervenção humana direta e podem ser incorporados a sistemas de produção complexos como o de operação de mina a céu aberto, onde interagem com outros equipamentos, que podem ser tripulados ou não. Os conceitos de perfuração e de transporte autônomos de materiais consistem, basicamente, em automatizar as principais funções do equipamento quando em modo produtivo. O caminhão autônomo, por exemplo, é capaz de, seguindo orientações do sistema de otimização de produção, se dirigir até a praça de carregamento, aguardar em eventuais filas para carregar, se posicionar junto ao equipamento de carga - este tripulado - ser carregado, se deslocar até o ponto de destino respeitando todas as

normas de tráfego, interagindo de forma adequada com os demais veículos durante o percurso e, por fim, bascular o material e reiniciar o ciclo de operação, repetindo ou não os pontos de origem e destino anteriores.

A Vale, desde 2012, aplica tecnologias de perfuratrizes autônomas em suas operações. Em 2016 iniciou-se o projeto de implantação dos caminhões fora-de-estrada autônomos na mina de Brucutu, em São Gonçalo do Rio Abaixo, MG. Esta tecnologia tem o intuito de substituir os caminhões fora-de-estrada convencionais de forma a proporcionar maior previsibilidade na operação, economia na manutenção, combustível, custos de mão de obra e maior produtividade do sistema. O sistema empregado na Vale é o *Command for Hauling*, fornecido pela Caterpillar. Neste sistema, são montados “kits autônomos”, que fornecem ao caminhão “hardware” e “software” necessário para se tornar autônomo.

Para que o caminhão autônomo desempenhe os ciclos de transporte de forma automática, o ambiente da mina é previamente virtualizado; as pistas e áreas de manobra são mapeadas por veículos leves e as áreas onde os caminhões irão trafegar são classificadas como áreas de carga, tráfego ou basculamento. Nas áreas de carga e basculamento podem existir áreas de movimentação dinâmica - o caminhão define livremente como ele se movimentará naquela região. Nas áreas de pistas, limites são estabelecidos e rigorosamente obedecidos. Os operadores do sistema, lidam, então, com uma mina virtualizada, mostrada na Figura 1.2.

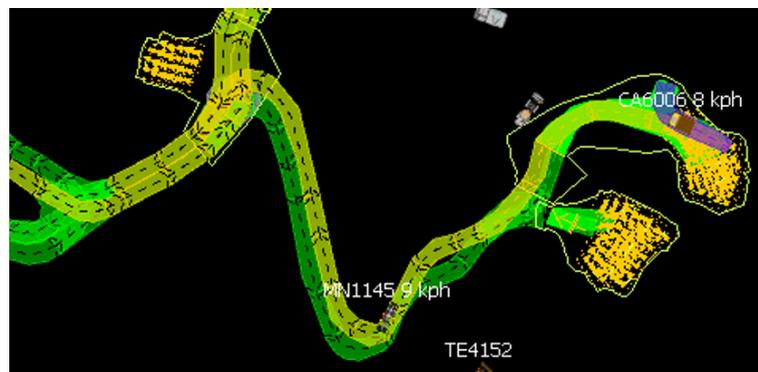


Figura 1.2: Mina virtualizada; acessos e praças de carga e basculamento são mapeadas no ambiente físico e representadas no sistema de operação remoto.

Os caminhões são equipados com sensores e atuadores que permitem que o equipamento perceba o ambiente e reaja às ocorrências durante o percurso, bem como sistema de comunicação que os inserem em um contexto de interação e colaboração sistêmica de produção. A figura 1.3 mostra o diagrama de funcionamento da operação assistida dos caminhões autônomos, definindo os pilares para funcionamento do sistema; comunicação via rádio e conjuntos de percepção, controle e georreferenciamento.

O então denominado “sistema de controle” do equipamento reúne todas as interações em malha fechada existentes no equipamento. Previamente calibrados, os sistemas de direção, freios e motriz recebem valores de referência calculados pelo algoritmo do sistema. Os atuadores, realimentados por cerca de 2000 pontos de leitura de medição embarcados, garantem o

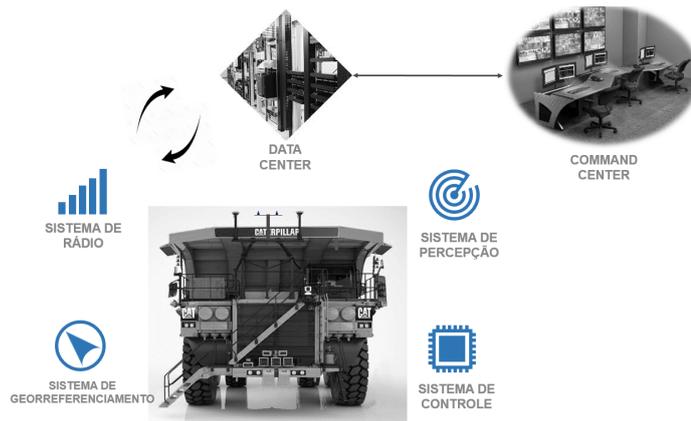


Figura 1.3: Diagrama do AHS - Caminhão e seus subsistemas, *Data Center* e *Command Center*.

comportamento esperado de operação.

O sistema de percepção capta informações em tempo real de objetos com comportamentos dinâmicos ou estáticos, assimilam as condições da superfície do local de rodagem, como elevações ou desníveis e identificam eventuais alterações no cenário que requeiram ou não ação em resposta. O sistema de percepção fornece, portanto, dados para o sistema de controle autônomo assumir decisões seguras durante o deslocamento, garantindo a integridade do equipamento e evitando a colisão com obstáculos, queda de bancadas ou risco de tombamento em piso irregular. Especificamente para o sistema AHS (em inglês, *Autonomous Haulage System*) são utilizados os sensores do tipo radar e lidar, além de sensores inerciais:

- **LiDAR:** O instrumento, em inglês *Light Detection And Ranging*, mede distâncias utilizando feixes de laser que refletem no anteparo e atingem os receptores. A partir do tempo entre a emissão e a recepção de um feixe, uma vez conhecida a velocidade da luz no meio, se obtém a distância. O lidar utilizado nos caminhões autônomos é fabricado pela Velodyne e possui um emissor giratório contendo 64 emissores e receptores lasers - combinados em diferentes ângulos - capazes de gerar até 1 milhão de pontos de leitura por segundo, em todas as direções, para detectar objetos estáticos ou em movimento a até 120 metros, mapeando tridimensionalmente o ambiente em qualquer condição de luminosidade. Apesar da boa cobertura provida por este instrumento, devido ao ângulo de emissão dos feixes laser, o lidar cria uma região de “sombra” de percepção na região mais próxima à frente do caminhão, que é coberta pelo radar do equipamento.
- **RADAR:** de forma análoga ao lidar, o radar emite ondas de rádio e empregando o efeito Doppler afere a presença, velocidade e a posição de objetos distantes até 15 metros. Operacionais mesmo em condições de baixa visibilidade como poeira e neblina, é capaz de detectar objetos em movimento mesmo que encoberto por outro obstáculo. Instalados logo acima dos pára-choques dianteiros dos caminhões, cobrem a região de “sombra” de percepção deixada pelo lidar.

- **IMU:** sigla em inglês para unidade de medição inercial, o IMU agrega conjunto de sensores, usualmente 3 giroscópios, 3 acelerômetros e 3 magnetômetros, que, de forma combinada, fornecem ao equipamento, por meio do sistema de gerenciamento de tração e estabilidade, a capacidade de reação em situações de falta de aderência dos pneus na pista, além de orientar o equipamento no traçado da pista na eventual perda de comunicação via rede. No caso sistema de controle de tração e estabilidade, o principal sensor do IMU é o acelerômetro, que provê informações em tempo real quanto a inclinação lateral e longitudinal do caminhão que, aliado às informações de GPS, é capaz de antever a trajetória e aplicar as medidas necessárias, como alterar o grau de tração dinamicamente, esterçar a direção ou aplicar os freios nas rodas de maneira individual de forma a manter o equipamento dentro das pistas virtuais estabelecidas pelo sistema.

Cabe ressaltar que o sistema de percepção dos equipamentos - constituídos pelo lidar e radar - se destina a atuar apenas em casos emergenciais e não tem função de orientar o equipamento quanto às rotas a percorrer. Apesar de todo o rigor imposto no controle de acesso de pessoas e equipamentos na área de operação autônoma, é preciso prever situações onde estes controles possam falhar e o equipamento autônomo possa se deparar com um obstáculo alheio ao cenário previsto. Além dos exemplos típicos de obstáculos encontrados em acessos dentro da mina, como “matacos” (grandes blocos de material mineral) e “borrachudos” (sulcos profundos na pista provocados por caminhões carregados), devido ao fato de que ambientes de mineração são tipicamente localizados em áreas rurais, animais de toda a sorte podem entrar inadvertidamente nas áreas de operação, como mostra exemplo da Figura 1.4. Ao se deparar com uma situação iminente de colisão com qualquer obstáculo, o equipamento realiza frenagem de emergência.



Figura 1.4: A presença de animais dentro da área de operação não é incomum e exige frenagem de emergência dos equipamentos autônomos.

O sistema de georreferenciamento se baseia em GNSS, sigla em inglês para *Global*

Navigation Satellite System ou Sistema de Navegação Global por Satélite, e consiste de um conjunto de satélites artificiais regularmente posicionados na órbita terrestre, navegando em altitudes entre 1.000 e 36.000 km, transmitindo continuamente um ou mais sinais contendo informação da hora exata, bem como seus parâmetros orbitais.

O uso do sistema de GNSS é extenso, principalmente para navegação aérea e marítima, rastreamento de cargas e levantamento topográfico, especialmente com a introdução da estação base e da correção RTK (*Real Time Kinematic*, ou posicionamento cinemático em tempo real), que levou a precisão à níveis milimétricos. Atualmente há 04 sistemas GNSS disponíveis, são eles o GPS (Estados Unidos), GLONASS (Rússia), BeiDou (China) e Galileo (União Europeia), sendo que os dois últimos entraram em operação em 2018 Li *et al.* (2015).

O sistema autônomo utiliza 02 receptores GNSS de alta precisão para operar. A existência de duas antenas permite ao sistema definir frente e traseira do equipamento. A leitura do sinal de no mínimo 04 satélites adequadamente espaçados conferem precisão de 20 milímetros. Havendo a perda ou degradação do sinal GNSS, o caminhão, principalmente deslocando-se em modo autônomo, por questões de segurança, interrompe a operação.

Todos os equipamentos que trafegam na área de operação, sejam eles autônomos ou não, são equipados com o sistema de georreferenciamento RTK. Durante a instalação deste sistema é definido um polígono virtual, obedecendo os limites físicos do equipamento - esse polígono se move com o equipamento, tendo o receptor GNSS como referência. O sistema comandará o deslocamento baseando-se no ambiente virtualizado, o qual contém parâmetros das pistas e áreas de manobras.

O sistema de rádio dos caminhões permite que os equipamentos tenham acesso à rede de comunicação do *Command Center* e receba informações sobre as demais entidades do sistema (localização, status), do ambiente onde ele trafega (limites das pistas virtuais) e designações de produção do algoritmo de otimização do sistema produtivo (despacho). Ele envia ao sistema constantemente dados dos demais sistemas citados; sua localização - provida pelo sistema de georreferenciamento - e dados de telemetria. Através da rede trafegam também os dados de correção RTK para garantir maior acurácia ao sistema de GNSS. O volume de dados deve trafegar entre os equipamentos e a sala de controle com altos requisitos de desempenho e confiabilidade.

Idealizados na década de 1970, os primeiros caminhões autônomos a serem efetivamente implementados foram 18 Komatsu 930E4 colocados em operação no Chile, na mina de cobre de Gabriela Mistral, em 2008. Em 2011 a Caterpillar iniciou testes com uma frota de 3 caminhões na mineradora BHP Billiton, na Austrália Brundrett (2014). A tecnologia que possibilitou a automação das perfuratrizes é contemporânea à dos caminhões e em 2013 a Vale iniciou suas operações autônomas de perfuração.

Desde então à medida que as empresas consolidam o uso da tecnologia autônoma e os usuários divulgam ganhos alcançados Gölbaşı e Dagdelen (2017), mais empresas adotaram a tecnologia e o número de equipamentos dotados de tecnologia autônoma vem crescendo. Se-

gundo levantamento próprio, ao fim de 2018, espera-se que 303 caminhões autônomos estejam em operação no mundo. E, para os próximos 3 anos, estima-se que a frota de caminhões autônomos em operação possua 778 caminhões, como mostra a Figura 1.5.

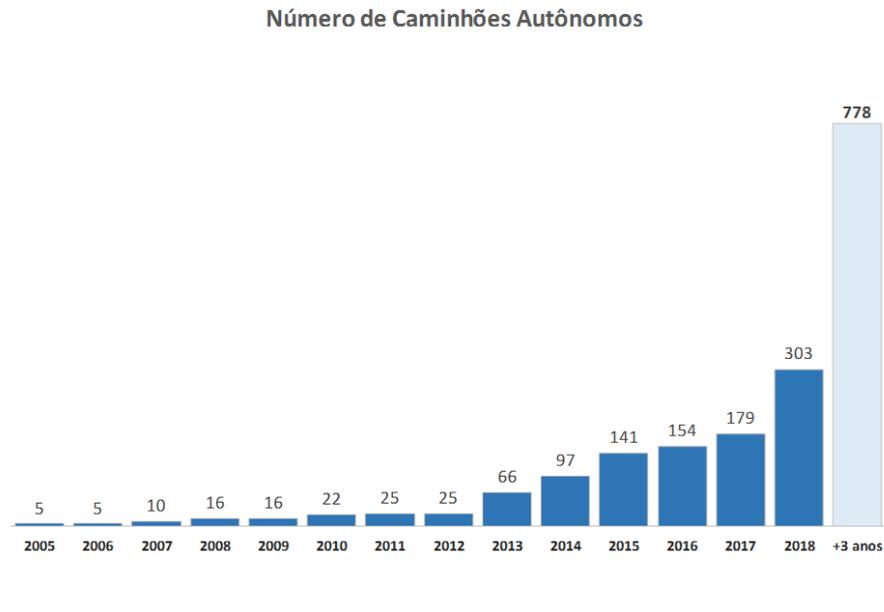


Figura 1.5: Histórico da frota mundial de caminhões autônomos e seu crescimento expressivo (157%) a partir de 2018.

Em muitas das tecnologias contemporâneas aplicadas a equipamentos autônomos se faz necessário o uso de comunicação sem fio entre equipamentos ou entre equipamentos e bases de controle. Também comum é a adoção de sistema de georreferenciamento de alta precisão. Entretanto, estes sistemas de alta tecnologia, na área de operação de lavra de mina, nunca foram componentes essenciais ao funcionamento das operações. Portanto, a súbita necessidade de uma rede sem fio de alta confiabilidade neste ambiente torna o tema desafiador e inédito sob muitos aspectos. Um dos complicadores existentes reside no fato de que as soluções de comunicação móveis contemporâneas foram desenvolvidas para atender à demanda de diferentes aplicações que não o uso em equipamentos de grande porte não tripulados em ambiente de mineração. Equipamentos de operação em rede possuem particularidades sob a ótica de tráfego de informações, como o fato da demanda de *upload* dos equipamentos ser maior que a *download*. O histórico de diversos fornecedores no ambiente industrial se mostra útil para atender apenas parcialmente aos anseios dos usuários deste novo nicho tecnológico, uma vez que as soluções específicas para o setor são ainda escassas e, quando existentes, adaptadas de outras aplicações, como a telefonia móvel.

Neste contexto, a alternativa remanescente é a gestão da rede de comunicação de forma robusta, uma vez que a confiabilidade deste sistema está diretamente associada à disponibilidade de produção. Torna-se especialmente crítica a gestão da rede sem fio, que é sensível ao ambiente na qual está implantada. Em uma mina a céu aberto, o ambiente é alterado de forma

dinâmica; a topografia é modificada a todo tempo, gerando potenciais perdas de comunicação devido à indisponibilidade de cobertura devido a áreas de sombra, alteração das superfícies do relevo causadas por supressão vegetal, criação de pilhas de estéril, construção de edificações - temporárias ou não - dentre outros fatores.

Atualmente, na mina de Brucutu, o impacto de problemas relacionados à rede de comunicação representam percentual relevante no total de paradas do sistema contabilizadas durante boa parte do ano de 2018, como mostra a Figura 1.6. A representatividade dos problemas relacionados à rede de comunicação (5% do total de horas de parada) é alta e, mesmo que o período avaliado represente a fase de implantação do projeto, este ponto demanda atenção.

HISTOGRAMA - MANUTENÇÃO	ACUMULADO [h]			IMPACTO NA DISPONIBILIDADE
	PLAN.	REAL.	(Dif.)	
ELETROMECA NICA CONVENCIONAL EQTO BASE MC	-	12%	-	-0.4%
DIAGNOSTICO DE EVENTOS/FALHA	-	9%	-	-0.3%
HMC - GARANTIA	-	7%	-	-0.3%
HMC - EXEC MECA NICA	-	6%	-	-0.2%
HMC - EXEC MANUT REDE COMUNICAO	-	5%	-	-0.2%
HMC - EXEC ELETRONICA/AUTOMACAO	-	4%	-	-0.1%
A GUARDANDO A SSISTENCIA TECNICA	-	3%	-	-0.1%
A HS CALIBRACAO PR	-	3%	-	-0.1%
DEMAIS MANUTENÇÕES	-	16%	-	-0.6%
MANUTENÇÕES PREVENTIVAS	432.6	34%	-432.2	-1.0%

Figura 1.6: Perfil das perdas de disponibilidade física entre janeiro de 2018 e novembro de 2018.

A Figura 1.7 representa um relatório de falhas da rede sem fio durante um período de tempo. Ao perder o sinal o equipamento “emite” uma bolha que cresce com a velocidade máxima cadastrada para aquele tipo de veículo - isso pois o sistema não conhece a localização daquele equipamento e, portanto, ele pode estar se movendo - no caso de equipamentos convencionais - em qualquer direção.

O monitoramento - seja de forma histórica, em tempo real ou preditiva - dos índices de desempenho de qualidade da rede, assim como um mapeamento de áreas deficitárias em cobertura e qualidade não é item contemplado nos produtos dos fornecedores Vale. Os produtos de mercado disponíveis para monitoramento de redes não apresentam solução abrangente que suporte, de forma integrada, diferentes tecnologias e fabricantes. Faz-se então necessário o desenvolvimento de ferramenta própria de monitoramento e diagnóstico. Atualmente o levantamento dos parâmetros de qualidade de uma rede existente são realizados por meio de *site surveys*; procedimento no qual é utilizado veículo que recebe instalação de estrutura completa para comunicação via rede sem fio (dispositivo de rádio e antenas) equivalente aos existentes nos demais equipamentos clientes da aplicação. É então conectada à rede interna do equipamento um notebook com uma antena GPS acoplada via USB e dotado de software específico para este fim. Uma vez iniciado o processo de coleta de dados pelo software, o veículo percorre as áreas de interesse formando uma base de dados correlacionando o RSSI e as coordenadas geográficas. O software então gera um arquivo nos formatos txt ou kml.

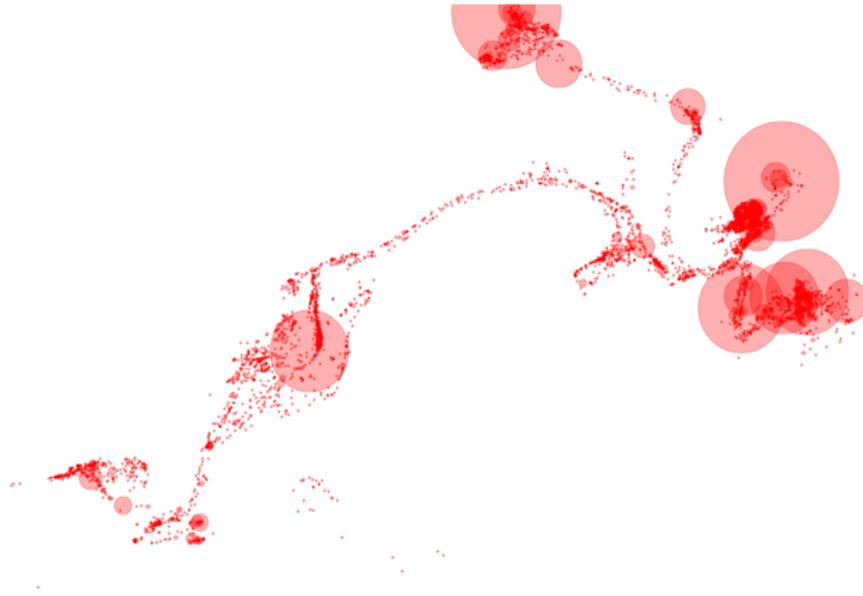


Figura 1.7: Perdas de sinal de comunicação da rede sem fio do caminhão autônomo representada por bolhas - cada uma significa uma ocorrência. O tamanho das bolhas representa o tempo de duração do erro.)

Em termos práticos, a execução desta rotina de *site survey* possui alguns problemas:

- **Tem caráter reativo:** via de regra os testes de *site survey* são realizados após a instalação de uma nova estrutura de rede - com a finalidade de avaliar a nova instalação - ou no caso de ocorrência de algum problema recorrente em determinada região de cobertura.
- **Requer muitos recursos:** devido à necessidade de preparação do veículo e do fato de se utilizar veículo dotado de estrutura compatível - normalmente camionetes com estrutura de rádio cliente e antenas - estes testes normalmente precisam ser agendados e redirecionam recursos de apoio à produção, como o próprio veículo, motorista apto a circular no ambiente de mina e “operador” do software de *site survey*. Caso seja necessária a realização destes testes de forma concomitante em dois ou mais locais da mina, faz-se necessária a quantidade dos recursos de forma proporcional.
- **Possuem duração limitada:** usualmente estes testes são realizados com duração de poucas horas, devido a disponibilidade da equipe, o que limita a quantidade de dados e podem não capturar problemas de caráter intermitente.
- **Possuem viés:** o fato da instalação de rádio a ser utilizada para o *site survey* possuir particularidades de instalação cria um viés, devido a fatores como posicionamento e altura de instalação das antenas, condição física dos elementos de hardware utilizados, dentre outros aspectos estruturais únicos daquela instalação.
- **Impacta o ambiente de produção:** ao se acrescentar veículo de teste no ambiente de

produção é causado impacto na produtividade devido à interação deste com os demais equipamentos em regime de produção.

1.1. Objetivos

Este trabalho propõe a criação de ferramenta própria de monitoramento, armazenamento e diagnóstico que sirva de plataforma para tomada de decisões quanto ao projeto e adequação da infraestrutura de rede de telecomunicações, além de servir como forma de validação dos resultados provindos de ferramentas de predição de cobertura de rede. A plataforma se baseará em dados obtidos dos rádios dos caminhões autônomos e de outros equipamentos que utilizam a rede sem fio que são dotados de sistemas de GPS de alta precisão. As informações de rede e de posicionamento, sincronizadas, irão gerar informações para alimentar um mapa do status da rede - tal qual um *site survey* convencional - porém sem a necessidade de ir à campo para executá-lo. A distribuição espacial dos pontos de coleta, se distribuídos em um mapa do local, gera informações úteis sobre a cobertura da rede naquela região. Estas informações são analisadas e, como ação de melhoria, podem ser realizadas alterações nos parâmetros de transmissão, posicionamento de equipamentos móveis de infra-estrutura, dentre outras medidas de forma a corrigir uma deficiência ou tendência de piora na rede de comunicação naqueles locais.

Com a possibilidade de se realizar esta coleta de forma remota, automatizada e escalável - torna-se mais viável monitorar mais de um equipamento ao mesmo tempo - faz com que esta atividade possa ser executada mais frequentemente e com caráter preventivo. O baixo custo de armazenamento dos dados permite que se mantenha a coleta ativa durante longos períodos, permitindo, além da criação de uma base de dados com histórico de medidas georeferenciadas, que esta base alimente outras ferramentas no futuro - possibilidade que será abordada de forma concreta mais adiante neste trabalho.

A proposta para o processo de aquisição, tratamento, armazenamento e uso dos dados para gerar a visualização obtidos dos equipamentos pode ser visto na Figura 1.8 e será detalhado adiante.

Concisamente, podemos elencar os principais objetivos deste trabalho:

1. Criar uma ferramenta alternativa ao procedimento *site survey*, tornando o processo de obtenção de dados de qualidade de rede mais simples, ágil e escalável.
2. Gerar uma base de dados de características georreferenciadas de redes sem fio das operações autônomas na Vale que sirva de referência histórica, possibilitando monitorar alterações nos padrões de qualidade ao longo do tempo.
3. Realizar validação do modelo VALE de propagação de ondas de rádio, que será explicitado adiante no trabalho

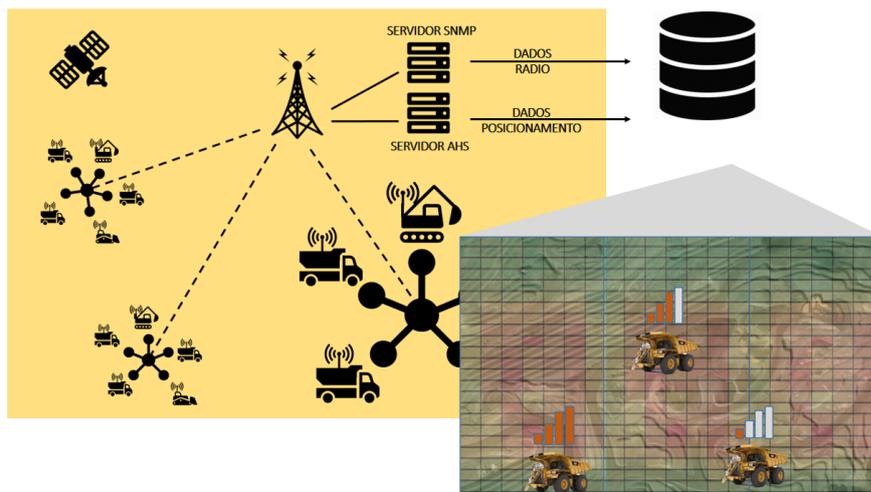


Figura 1.8: Infograma do processo; dados são obtidos dos equipamentos e alimentam ferramenta gráfica.

4. Gerar base de conhecimento para desenvolvimento de ferramenta gráfica de monitoramento em tempo real das condições da rede sem fio em operações não tripuladas

Os dados gerados durante o processo de desenvolvimento da ferramenta servirão, ainda, como registro temporal da rede sem fio de Brucutu, além de viabilizar auditorias, criar subsídio para diversas outras aplicações, a partir dos dados históricos que estarão disponíveis a partir de então.

1.2. Organização do Trabalho

O restante deste documento está estruturado da seguinte forma: no Capítulo 2 serão sedimentadas as bases teóricas; inicialmente realizada abordagem quanto ao uso de redes sem fio na indústria de mineração - com destaque para o padrão de comunicação WiMAX. Técnicas de modelagem do meio de propagação, bem como alguns modelos de interesse são expostos. São brevemente abordados o funcionamento do protocolo SNMP e o conceito de REM. No Capítulo 3 são elencados os procedimentos de execução das atividades e como eles foram criados. Nesse Capítulo é realizada a descrição dos equipamentos e ferramentas aplicadas e quantificados os requisitos e parâmetros relacionados ao local de implementação do trabalho. No Capítulo 4 são demonstradas, inicialmente, as metodologias e resultados da validação dos dados de rede e de posicionamento obtidos e, posteriormente, os resultados da criação da base de dados georreferenciada; *site surveys* gerados remotamente além de realização de análise e validação temporal de modelo determinístico proposto para a área de lavra atual de Brucutu (*Vale model*). Será também explicitado o levantamento de requisitos de novo software, derivado da ferramenta criada, capaz de prover dados em tempo real, tornando a plataforma acessível via web e escalável quanto à aplicação em outras localidades da Vale. O Capítulo 5 fecha a discussão e resume os

resultados obtidos, confrontando-os com objetivos do trabalho.

2. Revisão Bibliográfica

Está em curso a quarta revolução industrial, também chamada de Indústria 4.0. O conceito foi apresentado em 2011 Zhou *et al.* (2016), e tem como peça fundamental a conectividade da linha produtiva. Neste ambiente destacam-se os conceitos de IoT (sigla em inglês para Internet das Coisas) e de comunicação Máquina para Máquina (M2M). A Indústria 4.0 é consequência natural e evolutiva devido à capacidade crescente de processamento dos computadores (lei de Moore Borenstein *et al.* (2017)), grande volume disponível de informação digital (*Big Data*) e consolidação da internet, agora implementada em máquinas e equipamentos.

O uso de rede sem fio tem se tornado cada vez mais importante no crescimento e consolidação da IoT. De acordo com a *Global System for Mobile communication Association (GSMA)*, bem como outras previsões, a comunicação por rede sem fio corresponderá por mais de 10% do mercado de IoT em 2020 Mumtaz *et al.* (2017). Por meio das redes de comunicação, dados de produção, performance, falhas dentre outras telemetrias são enviados remotamente e alimentam ferramentas de operação, monitoramento e de detecção de eventuais problemas. Via de regra o uso das redes sem fio se torna necessário quando um ou mais elementos de interesse - transmissor ou receptor - se encontram em locais onde não é possível ou desejável alcançar com infraestrutura cabeada ou quando estão instalados em veículos ou equipamentos móveis.

2.1. Redes sem fio na indústria mineral

Na mineração, o uso de redes sem fio é consagrado em algumas aplicações, como em máquinas de pátio, instrumentação em adutoras de captação e outros locais remotos e, principalmente, nos equipamentos de mina, como caminhões e pás carregadeiras, que fornecem tradicionalmente via rede, além dos dados de saúde do equipamento, informações sobre a produção e sua localização geográfica, que alimentam sistemas de controle de produção e despacho. A criticidade desta rede para o sistema produtivo como um todo cresce quando a rede atende aos equipamentos autônomos ou tele-operados, uma vez que estas tecnologias são plenamente dependentes da comunicação. O ambiente industrial lida com diferentes requerimentos de conexão, variando de sistemas de comunicação por voz (cerca de 20 kbps de taxa), alta tolerância a perda de bits ($BER = 10^{-3}$ ou menos) e latência de no máximo 100 ms - ou podem tornar a experiência impraticável - até sistemas de aquisição de dados que possuem altos requerimentos quanto à taxa (1-100 Mbps), com baixa tolerância a erros ($BER = 10^{-8}$ ou menos) e que bits errôneos precisam ser retransmitidos porém sem limites fixos de latência. Outro exemplo são as transmissões em vídeo, que possuem altos requisitos de taxa e tolerância à latência próximas às comunicações via voz. Portanto, um único sistema de comunicação sem fio dificilmente irá conseguir atender a todos estes diversos perfis de requisitos - normalmente satisfeitos em um único protocolo quando se trata de rede cabeada Goldsmith (2004). Logo, a solução usualmente adotada pelas indústrias com diversas aplicações com diferentes requisitos é o uso de múltiplas

soluções combinadas.

O licenciamento, realizado na forma de concessão pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) é justificado, segundo a própria agência na lei geral de telecomunicações, de 1997 e na resolução número 671 de 2016, pela constatação de que o espectro de radiofrequências é um recurso limitado, constituindo-se em bem público, administrado pela Agência e visa, ainda i) a utilização eficiente e adequada do espectro, ii) o emprego racional e econômico do espectro, iii) a ampliação do uso de redes e serviços de telecomunicações e, v) a autorização para o uso de radiofrequências a título oneroso.

Portanto, podemos dividir as redes sem fio em duas categorias: redes de espectro não licenciado, ou seja, que não requerem processo de concessão de uso de frequência junto à ANATEL e redes de espectro licenciado, onde a concessão se faz necessária.

2.1.1. Redes de Espectro Não Licenciado

Assim como ocorreu com os equipamentos autônomos, os instrumentos de campo incorporaram funções cada vez mais avançadas, a ponto de serem denominados “Smart Devices” ou dispositivos inteligentes, dada a capacidade de medir, processar e transmitir informações de campo. Estes dispositivos, capazes de informar dados sobre sua saúde e de quando requerem manutenções, foram muitas vezes renegados devido aos altos custos de instalação e conexão à rede de dados. Entretanto, redes sem fio tornaram a arquitetura de sistemas distribuídos mais acessível Nixon (2012). São exemplos os protocolos que utilizam tecnologia IEEE 802.15.4 os protocolos *wireless HART* e *ZigBee*.

Wireless HART

O protocolo HART, sigla em inglês para *Highway Addressable Remote Transducer*, tradicionalmente utiliza-se, na camada física, de sinais de 4 – 20mA transmitidos por cabos elétricos para, utilizando FSK (*frequency-shift keying*), sobrepor um sinal digital para enviar informações. Na versão 7 do protocolo o HART incorporou a tecnologia sem fio baseada no IEEE 802.15.4 como opção para sua camada física e é comumente chamada de *Wireless HART*. O protocolo foi desenvolvido baseando-se nos princípios da simplicidade de implementação e utilização, além da flexibilidade - uma vez que se aplica à diversas aplicações, escalável, confiável e segura Lennvall *et al.* (2008).

Wireless HART é uma rede baseada em TDMA (*Time Division Multiple Access*), onde todos os dispositivos são sincronizados no tempo e se comunicam durante intervalos de tempo pré-definidos. A estrutura TDMA evita colisões e diminui o consumo de energia dos dispositivos em rede. O *Wireless HART* opera na frequência de 2,4GHz e forma redes com topologia mesh, que permite caminhos redundantes que possibilitam que as mensagens cheguem até o destino evitando obstáculos físicos, eventuais perdas de conexão e interferências.

Redes ZigBee

A especificação ZigBee é de camadas superiores, derivada do padrão IEEE 802.15.4 para camadas físicas (PHY) e de enlace (MAC). A topologia mesh também é aceita e o sistema de roteamento é possível por meio do algoritmo AODV (Ad-Hoc On-demand Distance Vector), onde um dispositivo que deseja enviar uma mensagem a outro dispositivo da rede solicita aos seus vizinhos se a rota é possível por através dele e, desta forma, os vizinhos propagam até que o destinatário seja encontrado e a rota, estabelecida. Isso significa que cada dispositivo é responsável por encontrar a própria rota, porém a comunicação entre dispositivos é possível.

Enquanto o padrão *Wireless HART* encontrou sucesso no mercado, o ZigBee é criticado enquanto aplicação industrial, principalmente pela sua falta de robustez, devido à falta de diversidade de frequência; todos os dispositivos compartilham o mesmo canal de forma estática, levando o padrão a ser vulnerável a meios propensos a conter estruturas metálicas - que formam canal atenuador seletivo quanto à frequência. Além disso, o uso da frequência estática é causador de interferência em outros sistemas, como redes LAN. Como ponto forte do ZigBee, destaca-se o consumo de energia Lennvall *et al.* (2008), que pode ser aspecto crítico em algumas aplicações.

Redes WiFi

Equipamentos que utilizavam redes da família do padrão IEEE 802.11 ou simplesmente redes WiFi (abreviação do termo *wireless fidelity*), surgiram em meados da década de 1990 e rapidamente alcançaram o mercado devido à facilidade de implementação e, quando o custo dos dispositivos se tornou mais acessível, na década de 2000, a tecnologia se tornou o padrão de comunicação sem fio para diversos usos Sauter (2011), inclusive no âmbito industrial.

De amplo uso, a tecnologia Wi-Fi da família 802.11 possui grande número de padrões com suportes a diferentes frequências e e funcionalidades. Resumidamente podemos dividir os padrões da camada física, quanto ao suporte às frequências de operação conforme a Figura 2.1.

Standard	Frequency band	Speed (Mbit/s)
802.11b [3]	2.4 GHz (2.401–2.483 GHz)	1–11
802.11g [4]	2.4 GHz (2.401–2.483 GHz)	6–54
802.11a [5]	5 GHz (5.150–5.350 GHz and 5.470 to 5.725 GHz)	6–54
802.11n	2.4 GHz (as above) 5 GHz (as above)	6–600

Figura 2.1: Características dos padrões da camada física 802.11 quanto às frequências e banda Sauter (2011)

O surgimento do padrão 802.11b foi determinante para consolidar o uso da rede WiFi, uma vez que proporciona taxa de transmissão de 1 a 11 Mbps, embora o valor máximo só seja alcançado em ambientes reais quando implementado em locais com meio de propagação entre transmissor e receptor livre de obstáculos e, mesmo assim, a distâncias de poucos metros. Em locais onde há distâncias maiores, a taxa praticada é de 1 Mbps. O padrão 802.11b utiliza frequência de 2.4 GHz, que é de espectro não licenciado, desde que seja respeitada o limite de potência de transmissão de 100 mW.

Já o padrão 802.11g especifica um protocolo bem mais complexo que o padrão 802.11b para que sejam alcançados taxas de transmissão de até 54 Mbps, embora utilize também a frequência de 2.4 GHz e é compatível com sistemas que utilizem o padrão 802.11b. Em adição à banda de frequência de 2.4 GHz, o padrão 802.11a utiliza 5 GHz e taxas de transmissão entre 6 e 54 Mbps. Entretanto, este padrão não se tornou muito popular e os equipamentos que o utilizam precisaram se tornar compatíveis com 802.11b, suportando diversas faixas de frequência e aumentando seus custos Sauter (2011).

Devido à massificação do uso e da alta disponibilidade de equipamentos e mão de obra especializada, nos dias atuais as redes Wi-Fi constituem na principal tecnologia de rede utilizada da indústria de mineração a céu aberto. As principais demandas de rede sem fio vêm dos

sistemas de despacho - otimizadores de produção da mina - e telemetria, além de transportar mensagens do sistemas de posicionamento de alta precisão relacionados à projetos de infraestrutura e perfuração. Mas também podem ser vistas em outros sistemas móveis, como máquinas de pátio.

Até a chegada dos caminhões autônomos na mina de Brucutu a rede utilizada para atender o sistema de despacho em Brucutu utilizava rede Wi-Fi Mesh no padrão 802.11b/g em 2.4 GHz interligando equipamentos e pontos de acesso e 802.11a 5.8 GHz formando o *backbone* da rede, interligando os pontos de acesso. Nesta configuração a região da mina contava com cobertura ampla, disponibilizada pelos pontos de acesso montados sobre várias unidades móveis. Entretanto, a cobertura não era completa em toda área operacional: existiam vários pontos de "sombra" e regiões intencionalmente sem atendimento. Em um sistema de despacho convencional a ausência de rede em determinadas áreas não é tão crítica quanto no sistema autônomo, pois o este sistema não depende de informações online e é capaz de acumular as informações a serem recebidas e transmitidos até obterem acesso à conexão e, então, realizar a troca dos dados.

A rede era disposta em topologia *mesh*, onde os nós se conectam diretamente, de forma dinâmica e não hierárquica, a vários outros nós - todos capazes de receber e retransmitir informações dos demais. A conexão é estabelecida de forma a maximizar a eficiência da rota entre os nós e, neste caso, os servidores de despacho. A ausência de hierarquia de conexão entre os nós permite uma organização dinâmica e é capaz de superar eventual falha em um dos nós no caminho até o destino final. A Figura 2.2 mostra uma topologia típica deste tipo de rede, onde vários pontos de acesso (móveis ou não) provêm cobertura por meio de várias células.

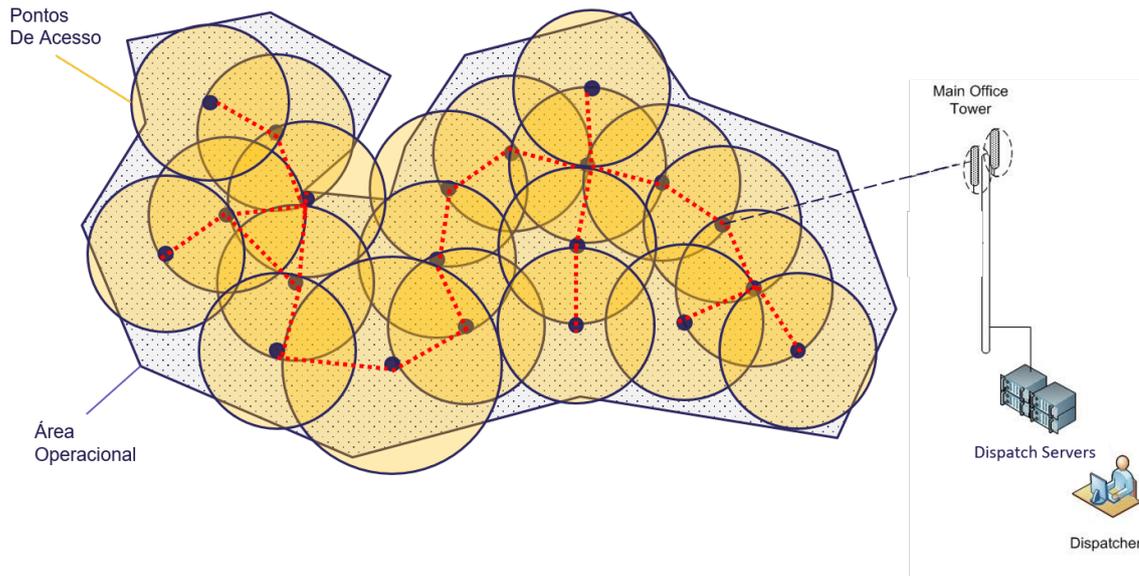


Figura 2.2: Topologia típica de uma rede Mesh. As conexões, em vermelho, são estabelecidas entre os nós de rede de forma dinâmica.

Entretanto, a característica dinâmica da rede *mesh* pode levar a criação de gargalos na rede onde um nó da rede *mesh* concentra o tráfego de vários equipamentos prejudicando o desempenho. Isso é especialmente crítico em aplicações com grande demanda de taxa de transmissão, como sistemas de vídeo.

Portanto, cada tecnologia de rede sem fio apresentada possui pontos fracos e fortes e, para um ambiente de requisitos heterogêneos, as soluções que envolvem a combinação de tecnologias permitem o atendimento de cada vez mais propósitos, inclusive de caráter crítico. Estes propósitos vão desde aplicações de baixa criticidade, como controle de acesso e monitoramento de segurança patrimonial utilizando hardwares de baixa complexidade e baixo consumo energético, como o padrão zigbee Yang e Huang (2007), até aplicações que exigem alta confiabilidade, como sistemas de suporte à navegação de veículos autônomos em ambientes urbanos e rodoviários Peng *et al.* (2017), este atendidas por redes mais robustas.

No ambiente de mineração, destacam-se as aplicações intrinsecamente dependentes de redes de alta confiabilidade como sistemas de operação autônoma; perfuratrizes autônomas e caminhões autônomos Gölbaşı e Dagdelen (2017). Dentre as tecnologias de rede que suportam estas aplicações deste tipo, destacam-se os padrões WiMAX, atualmente empregado na Vale em diversas operações, atendendo à tecnologias de perfuração e transporte autônomo e LTE, que ocupa o papel de “rede de campo do futuro” no *roadmap* de tecnologia de rede da Vale e de outras empresas do segmento de mineração a céu aberto.

2.1.2. Redes de Espectro Licenciado

WiMAX

A rede WiMAX é baseada no padrão IEEE 802.16 é considerada uma rede do tipo *Broadband Wireless Access* que se caracteriza por ser uma rede com alta taxa de transmissão de dados entre um ponto de acesso fixo e múltiplos terminais. Inicialmente concebida para prover serviços de vídeo em áreas residenciais as aplicações desta rede a tornaram uma solução para prover acesso à internet e constituir redes de alta capacidade (dezenas de Mbps) em residências e estruturas industriais Goldsmith (2004). Historicamente o primeiro padrão IEEE 802.16 atendia primariamente a ambientes LOS (*Line-of-Sight* ou com visada direta) operando em altas frequências (10-66GHz) utilizando QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) convencional. O potencial limitado para ondas milimétricas com LOS resultaram no desenvolvimento de complementos para suportar cenários NLOS em faixas de frequência além da faixa 2-11GHz inicialmente prevista Wang *et al.* (2008).

As melhorias das funcionalidades relacionadas à mobilidade dos clientes WiMAX vieram no complemento 802.16e e publicadas pelo IEEE no início de 2006 e por isso o padrão também é denominado *Mobile WiMAX*. A especificação 802.16e (conhecida também como 802.16-2005) contém melhorias no suporte à troca de conexão entre células (*handover*), ao *sleep mode*, dentre outras evoluções. Outra importante adição no padrão 802.16e é a introdução na camada física OFDM escalável com subportadoras de tamanhos 128, 256, 512 e 1024 em adição ao tamanho inicial de 2048 - tópico abordado com mais detalhes em Yu e Yen (2015). Já no primeiro lançamento do sistema *Mobile WiMAX* o padrão suportava transmissões em TDD (*Time Division Duplex*) para *downlink* e *uplink*¹. Além destas funcionalidades este perfil também suporta esquemas de reuso de frequências e tecnologias de múltiplas antenas Wang *et al.* (2008). No decorrer do trabalho a nomenclatura WiMAX será utilizada para denominar o padrão 802.16e ou 802.16-2005 ou mesmo *Mobile WiMAX*.

WiMAX no modelo OSI

O modelo OSI (*Open System Interconnection*) define sete camadas que descrevem como aplicações que são executadas por dispositivos em rede se comunicam entre elas e, geralmente, o modelo se aplica a todo o tipo de rede de comunicação Briscoe (2000).

O padrão IEEE 802.16 abrange as camadas física e de enlace do modelo OSI. A camada física (PHY), como o nome sugere, define as características físicas e elétricas da rede. A camada PHY do WiMAX, conforme citado, especifica várias opções de sub-portadoras para canais de

¹Em Brucutu utiliza-se a divisão de 70% para *uplink* e 30% *downlink* na configuração de TDD. Essa configuração justifica-se devido à particularidade da aplicação; no sistema autônomo implantado os equipamentos autônomos enviam mais informações via rede que recebem, uma vez que são eles quem fornecem informações de campo, em tempo real, à aplicação central, que realiza a otimização de operação.

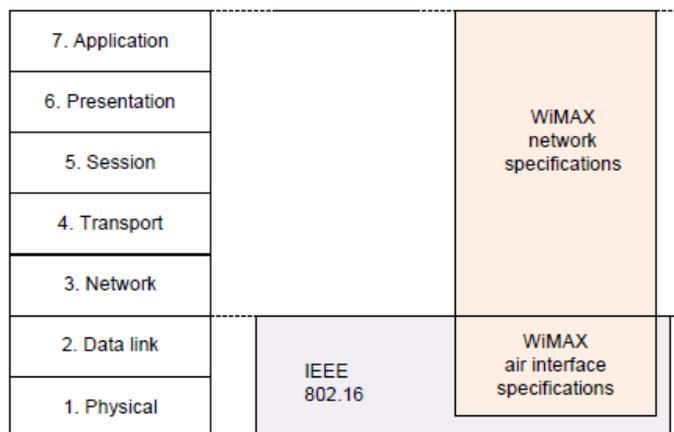


Figura 2.3: WiMAX na estrutura OSI Pareit *et al.* (2012)

dados e podem ser tanto diversas como seletivas em frequência Wang *et al.* (2008). No WiMAX a camada física não só estabelece a conexão entre dispositivos de comunicação, mas também é responsável por definir a modulação / demodulação tipo de transmissão.

A camada de enlace ou de link de dados define a estratégia para compartilhar o meio físico e fornece a interface entre a camada física e a de transportes. Em uma transmissão típica a camada MAC recebe os dados das camadas superiores e os segmenta em PDUs (sigla em inglês para Unidade de Protocolo de Dados) para que possam ser transmitidos por meio do canal. Portanto, o WiMAX suporta tanto protocolo IP (*Internet Protocol*) e Ethernet. No WiMAX a camada MAC apresenta outras três sub-camadas; sub-camada de Segurança, sub-camada de parte comum e sub-camada de Convergência. A sub-camada de parte comum é principal parte da camada MAC e tem como função manter a conexão, realizar a formação do PDU e alocar as larguras de banda. A subcamada de segurança é responsável pela criptografia dos dados Ahson (2007).

A arquitetura de rede WiMAX tem como referência os serviços de IP e pode ser dividida em três partes: MS (*Mobile Station*), CSN (*Connectivity Service Network*) e ASN (*Access Service Network*).

Cada entidade lógica de MS, ASN e CSN e suas interações, mostradas na Figura 2.4 pelos pontos de referência R1 até R8, representam grupos lógicos de funções onde, basicamente, o MS (*Mobile Station*) é o usuário a ser atendido pelo serviço, que pode ser móvel ou estático. ASN representa um conjunto completo de funções de rede requeridas para se prover acesso ao MS. Estas funções incluem a conectividade da camada de enlace de acordo com o padrão IEEE 802.16 e o perfil do sistema WiMAX. Já a CSN se refere ao conjunto de funções que prevê conectividade IP aos clientes WiMAX e pode compreender elementos da rede como roteadores, servidores *proxy* bem como servidores *gateway* e outros servidores que suportem serviços multicast e broadcast. As definições bem como as relações da arquitetura podem ser encontradas de forma detalhada em Pareit *et al.* (2012).

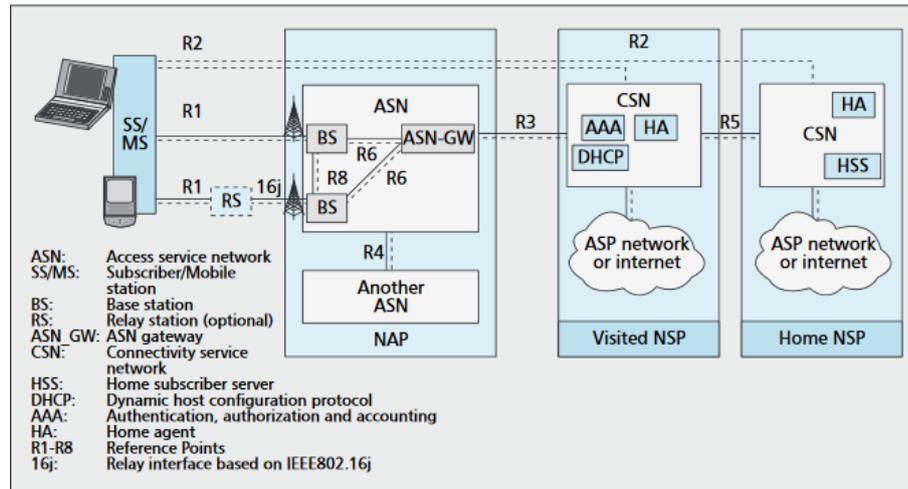


Figura 2.4: Arquitetura de rede WiMAX. Etemad (2008)

LTE

O padrão LTE (*Long Term Evolution*) é um padrão desenvolvido a partir das tecnologias GSM e UMTS para atender, principalmente, os mercados de telefonia móvel celular. Foi elaborado e é mantido pelo grupo de desenvolvimento industrial 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*). Sete versões especificando o padrão LTE foram publicadas, sendo a primeira em 2008, denominado “*Introduction of LTE, SAE, OFDMA, MIMO, Dual Cell HSDPA*” e o último, em 2016, que trata de evoluções do padrão. A partir desta data o esforço do grupo direcionou-se ao desenvolvimento da tecnologia 5G. As últimas duas publicações e uma terceira, prevista para 2020, tratam da tecnologia 5G.

A *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) divulgou, em 1992, o padrão GSM (*Global System for Mobile*) que evoluiu nos anos seguintes até que, em 2000 recebeu conjunto de funcionalidades que caracterizam o sistema UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*), que utiliza tecnologia W-CDMA (*Wideband Code Division Multiple Access* (W-CDMA) para garantir melhores taxas de transmissão por meio de aumento da eficiência espectral. Entretanto, segundo Sauter (2011) quando o UMTS foi elaborado, foi utilizada, de maneira ousada, uma solução com portadora com largura de 5 MHz que, por característica da W-CDMA, garante boa performance com essa largura de canal. Entretanto, a solução não apresenta boa escalabilidade nesse aspecto, pois quando se aumenta a largura da portadora para aumentar a taxa de transmissão de dados o tempo entre duas janelas de transmissão diminui e, quanto menor a janela de transmissão, maior o impacto no sinal recebido de efeitos de atenuação por multi-encaminhamento. Na tecnologia LTE a questão é abordada de outra forma. Ao invés de espalhar um sinal sobre a toda a largura de banda da portadora, o LTE utiliza OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) que transmite os dados através de muitas subportadoras de banda de menor largura (180 kHz). Ou seja, não há uma única transmissão rápida por meio de um “grande” canal, mas vários canais operando de forma simultânea com menores fluxos de dados cada um. Como consequência, a taxa de dados alcançável, quando comparado ao UMTS,

é similar na mesma largura de banda, porém minimizando o efeito multi-encaminhamento, que é bastante reduzido devido ao aumento do tempo entre as janelas de transmissão.

Para aumentar a velocidade de transmissão, o canal de transmissão é ampliado aumentando o número de subportadoras. Se um canal com largura de banda inferior a 5 MHz estiver disponível, o LTE pode se adaptar facilmente e o número de subportadoras é simplesmente reduzido. Várias larguras de banda estão especificadas para LTE e variam de 1.25MHz até 20MHz. Com um canal de 20 MHz disponível, taxas de até 100 Mbps podem ser alcançados, desde que com boas condições de recepção do sinal.

Todavia, na versão original (versão 8) do padrão LTE possuir bons parâmetros de conectividade, o fato da tecnologia utilizar frequências que estão na faixa do espectro que requer licenciamento introduz variável relevante no processo de desenvolvimento do projeto de rede sem fio.

No Brasil, as frequências de operação do LTE são licenciadas e estão, na sua grande maioria, concedidas a empresas do ramo de telefonia móvel, o que torna necessária a negociação com estes operadores ao implantar uma rede, mesmo na área de mineração, normalmente instaladas em áreas rurais e afastadas de comunidades. Atualmente na Vale estão em andamento diversos testes de uso de LTE no ambiente de mina a céu aberto e a homologação, por parte dos fornecedores de tecnologia de despacho e de equipamentos autônomos e tele-operados são etapas necessárias para a consolidação da tecnologia na empresa.

Segundo Boulter e Hall (2015), na Austrália, a Autoridade Australiana de Comunicações e Mídia (ACMA) se comprometeu a oferecer pequenas faixas do espectro de 1,8 GHz diretamente para empresas de mineração e energia, o que forneceria largura de banda suficiente para que estas empresas operem suas próprias redes LTE, independentemente das empresas de telecomunicações. Devido, em parte, à diferença na alocação de largura de banda da rede LTE na Austrália, a Rio Tinto implantou sua própria rede LTE privada na mina de West Angelas na região de Pilbara, na Austrália Ocidental em 2013. Esta é a mesma mina onde a Rio Tinto lançou uma grande parte da tecnologia para os caminhões autônomos. Ainda não há certeza quanto a generalização desta abordagem nas demais empresas do ramo, já que as tecnologias aprimoradas no espectro de Wi-Fi disponíveis apresentam desempenho similar.

De qualquer forma, a tecnologia LTE provou ser uma tecnologia viável para aplicação industrial, a princípio, com exemplos bem sucedidos fora do Brasil. Em uma escala mais ampla vários organismos de padronização e consórcios de pesquisa mostraram um interesse crescente em adotar a tecnologia LTE para suportar também aplicações de redes veiculares Ta *et al.* (2005), o que torna o estudo da rede LTE importante na abordagem de tecnologias com altos requerimentos de rede.

2.1.3. Futuro das Redes de Comunicação sem Fio no Ambiente da Mineração a céu aberto

Como foi mostrado no Capítulo 1, os novos requisitos de rede sem fio para a indústria 4.0 aumentaram em relação às tecnologias previamente existentes na indústria da mineração a céu aberto. A tendência é que esses requisitos se tornem cada vez mais desafiadores. Segundo Boulter e Hall (2015), ao considerar novas tecnologias ou atualizações das redes sem fio, responsáveis pela gestão dos negócios precisam olhar para o futuro para prever quais serão os possíveis requisitos, de modo que os projetos de rede sem fio possam ser implementados acomodando suas necessidades. Com os sistemas existentes sendo descontinuados ou, no mínimo, perdendo o acesso ao suporte técnico, há exemplos na indústria dos perigos de tornar obsoleta a estrutura de telecomunicações. A renovação do parque tecnológico, uma vez renegada, incorrem em custos de capital significativos para implementar novas redes, a fim de oferecer suporte efetivo a tecnologias atuais e futuras.

Considerando a popular Lei de Moore Moore (2004), usada para prever o futuro número de transistores em um microprocessador, determinando assim sua capacidade de computação, a Lei Nielsen Lewin *et al.* (2009) foi criada por Jakob Nielsen para relacionar o consumo futuro de dados sem fio a uma curva semelhante de previsibilidade, como uma comparação entre a Lei de Moore e a tendência futura para o volume de transferência de dados. Esta lei foi originalmente concebida para prever a progressão da velocidade de acesso à Internet em escala pessoal ou comercial. No entanto, se restringirmos esse conceito à Internet das Coisas (IoT), exemplo mostrado na 2.5, um equipamento de mineração autônomo comunicando-se continuamente com o sistema de controle para transferir informações como localização, velocidade, energia e consumo de combustível, então podemos prever um crescimento na taxa de transferência de dados e, portanto, os requisitos futuros dessa rede sem fio, para uma mina a céu aberto.

Dentre as tecnologias de comunicação sem fio destacam-se a 5G, caracterizada pela evolução do padrão 4G, desenvolvida pelo grupo 3GPP. Segundo Morgado *et al.* (2018), a característica distintiva do 5G é sua flexibilidade intrínseca, que permitirá atender vários usos de maneira otimizada, seja usando espectro abaixo de 1 GHz, frequências “médias”, de 1 GHz a 6 GHz ou espectros no chamado campo das ondas milimétricas, quando a frequência usada está acima de 6 GHz.

O espectro de baixas frequências é considerado essencial para casos de uso que exigem cobertura ininterrupta e alta mobilidade, como é o caso das Comunicações de Baixa Latência ultraconfiáveis (URLLC) e Comunicações Massivas de Tipo de Máquina (mMTC). O espectro de média frequência será utilizado pelas primeiras redes 5G para suportar *Enhanced Mobile Broadband* (eMBB), que é vital para demonstrar o estudo de caso da tecnologia 5G e promover o investimento nesta solução. Quando as redes 5G se tornarem maduras, o eMBB terá que oferecer taxas de transmissão de dados com picos de 20 Gbps e taxas de transmissão de dados individuais, por usuário, de 100 Mbps, considerando um número muito alto de usuários. Com as

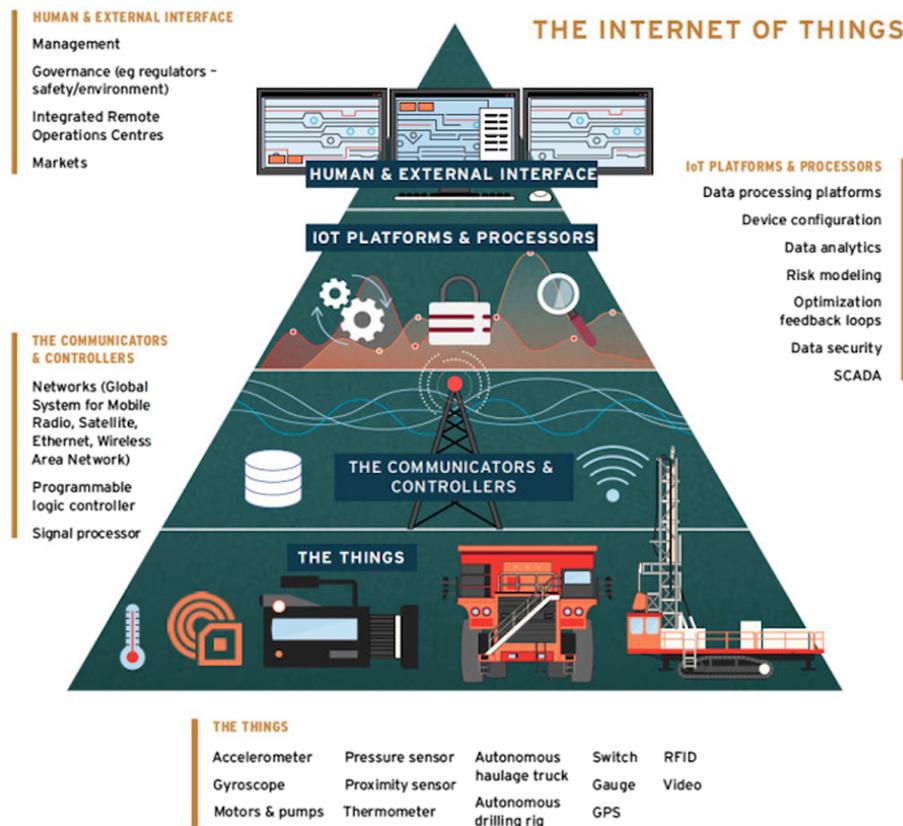


Figura 2.5: Representação em infográfico da Internet das Coisas no ambiente da mineração: a existência de “camada” dedicada a representação das redes sem fio demonstram sua importância no contexto. J. Lee e K. Prowse (2014)

eficiências espectrais viáveis, essas velocidades de transmissão só podem ser fornecidas usando canais com larguras de banda na ordem de várias centenas de megahertz, que estão disponíveis apenas em altas frequências Xiao *et al.* (2017), o que trará desafios relacionados ao alcance destas redes, que terão que possuir arquitetura capaz de atender a grandes áreas com poucas ou nenhuma área de sombra.

2.2. Modelagem e Predição

É importante destacar, entretanto, que para projetar, construir e manter as redes de comunicação sem fio é necessário entender o comportamento do sinal de rádio ao longo do caminho de propagação bem como como se dará sua atenuação neste ambiente. E para alcançar estas informações engenheiros de redes necessitam de métodos para mapear de forma precisa a cobertura de redes atuais e futuras, dependendo, para isso, de técnicas e ferramentas de predição baseadas em modelos de atenuação de sinal Phillips *et al.* (2012).

Os sinais em uma rede sem fio são ondas eletromagnéticas geradas a partir de transmissores e que propagam no meio até encontrarem o receptor. Por se tratarem de radiação eletromagnética, possuem relações matematicamente definidas e tem comportamento previsível e, portanto, passível de modelagem. A figura 2.6 mostra a geração da radiação eletromagnética por uma antena monopolo percorrendo um meio livre, ou seja, sem obstáculos.

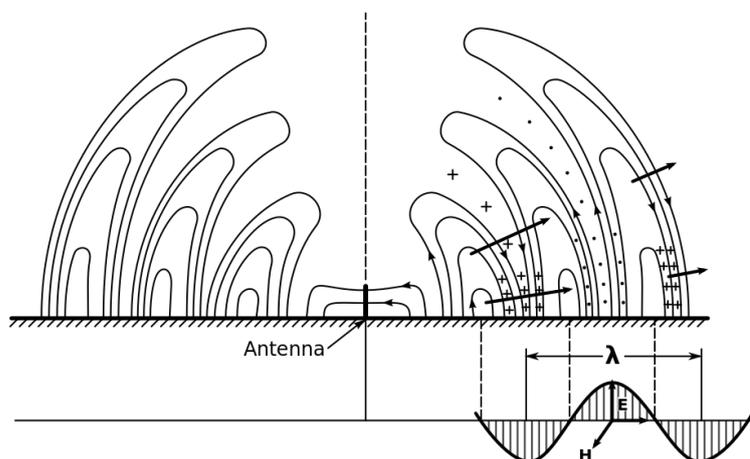


Figura 2.6: Diagrama dos campos elétricos (E) e magnéticos (H) emitidos por uma antena monopolo Stuart Ballantine (1922).

Entretanto, a modelagem da propagação da radiação em um meio não livre, ou seja, com obstáculos, é tarefa complexa, pois variáveis como materiais que compõem os meios de propagação, obstáculos que impõem reflexões - totais ou parciais - bem como a frequência do sinal emitido influenciam na integridade do sinal que será recebido pelo receptor.

Em Sarkar *et al.* (2003) é realizada uma descrição dos principais impactos os quais o canal - meio de propagação composto de suas características físicas e de eventuais obstáculos - pode impor ao sinal. Destacam-se entre elas a perda de propagação, que será abordado a seguir.

2.2.1. Técnicas de Modelagem de um Canal de Propagação

A modelagem matemática é a área do conhecimento que estuda maneiras de desenvolver e implementar modelos de sistemas reais. Os modelos matemáticos representam algumas das

características observadas de tal sistema. É importante ressaltar que um modelo possui algumas características do sistema real, mas não todas - tal qual uma maquete de um edifício não possui todas as características físicas daquela construção. A escolha das características a serem apresentadas no modelo é decisão importante e deve ser tomada com base no uso e aplicação daquele modelo Aguirre (2007).

A perda de potência do sinal associada à distância entre transmissor e receptor se refere a atenuação da potência do sinal durante seu trajeto, e a este fenômeno se dá o nome de perda de propagação, que pode ser definida pela equação 2.1:

$$PL(dB) = 10 \log \frac{P_t}{P_r} \quad (2.1)$$

onde P_t e P_r são as potências transmitidas e recebidas, respectivamente. No espaço livre, a potência a ser recebida pela antena receptora, separada pelo transmissor do sinal por uma distância $d > 0$ é dada pela equação de Friis:

$$P_r(d, \lambda) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (2.2)$$

onde G_t e G_r são os ganhos do transmissor e receptor, respectivamente. λ é o comprimento de onda em metros e L é o fator de perda, não relacionado à propagação. Nota-se, então, no que se refere ao meio, a potência recebida é sensível à distância percorrida e à frequência utilizada.

A modelagem do canal de propagação visando efeitos de larga escala se volta, principalmente, para efeitos de degradação provocados pela perda de propagação, relacionados à distância e ao meio, como apontado na figura 2.7.

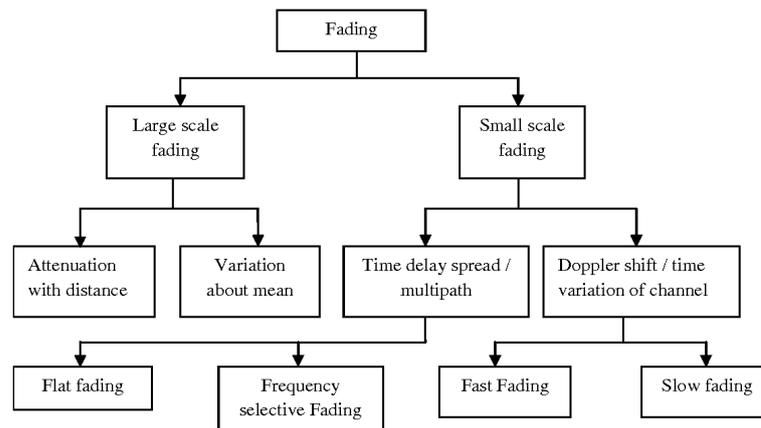


Figura 2.7: Principais mecanismos de degradação de sinal: Grande e Pequena Escala Golam Sadeque *et al.* (2015).

A degradação responsável pela perda de propagação é considerada um fenômeno determinístico Rappaport (2002) e tem nos mecanismos de 1) reflexão, 2) difração e 3) espalhamento os principais agentes de impacto Sarkar *et al.* (2003):

1. A reflexão ocorre devido à existência de obstáculos com grandes dimensões se comparadas ao comprimento de onda do sinal propagado. Em um ambiente de mina ocorre devido a presença de construções, equipamentos, pilhas e o próprio relevo, normalmente acidentado Sarkar *et al.* (2003). Quando ocorre a reflexão, pode haver refração associada. Os coeficientes de reflexão e refração dependem das propriedades do material do obstáculo, polarização do sinal, ângulo de incidência e da frequência da onda propagada Escudero (2004).
2. A difração acontece quando a obstrução do percurso de propagação ocorre parcialmente por estruturas com bordas obtusas. Estas estruturas podem ser total ou parcialmente absorventes. As ondas podem circundar o obstáculo, fazendo com que a onda alcance o receptor mesmo quando não há visada direta em relação ao transmissor. Assim como a reflexão, a difração depende da geometria do objeto e da amplitude, fase e polarização da onda incidente.
3. A dispersão da onda propagada ocorre quando o meio de propagação possui obstáculos de pequenas dimensões se comparadas ao comprimento de onda e quando o número de obstáculos por unidade de volume do meio é alto. Sensível à frequência, a dispersão em um ambiente de mina pode ser provocada por características do meio - atmosfera - ou por elementos das construções, folhagem da vegetação, postes, placas de sinalização, dentre outros.

2.2.2. Modelos de Interesse

Mapeados os principais influenciadores na composição de um modelo de propagação e conhecida a aplicação deste trabalho, faz-se suficiente abranger apenas os modelos que lidam com a caracterização do canal quantificando o perda de propagação.

Existem dois tipos principais de modelos para caracterização de perda de propagação; modelos empíricos ou estatísticos e modelos determinísticos, que atendem a locais específicos. Os modelos empíricos são baseados na caracterização estatística dos sinais recebidos. São de fácil implementação, requerem baixo esforço computacional e são pouco sensíveis à geometria do ambiente. Já os modelos determinísticos requerem conhecimento prévio da topografia e de construções da região. Estes modelos exigem maior esforço computacional, porém são mais assertivos Sarkar *et al.* (2003).

Segundo Almeida *et al.* (2018), o ambiente de mineração a céu aberto não é usualmente alvo de estudos de caracterização de canal e as fontes de referência para este tópico são escassas. No trabalho apresentado em Almeida *et al.* (2017), que propõe a utilização de modelos de

propagação para mensurar perda de propagação em mina de ferro a céu aberto, os modelos considerados foram os ITU-R 526, Okumura Hata, COST Hata e *Standard Propagation Model* (SPM), além de modelo proposto *Vale Model*, derivado do ITU-R 526, que será alvo de especial interesse neste trabalho.

ITU-526

Este modelo combina a perda de propagação em espaço livre (FSPL) com um componente de difração L_D :

$$PL_{ITU-526} = FSPL(f) + L_D \quad (2.3)$$

onde

$$FSPL(f) = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) - 27,55 \quad (2.4)$$

onde d é a distância, em metros, entre o transmissor e o receptor. f é a frequência em MHz. Já L_D pode ser calculado por diversos métodos, de acordo com o tipo de obstáculos ITU-R (2013).

Vale Model

O *Vale Model*, fruto de esforços nos estudos de modelagem e predição em áreas de mineração; o Instituto de Tecnológico Vale (ITV), em parceria com o Instituto de Desenvolvimento Tecnológico (INDT) e a Aalborg University, na Dinamarca, utiliza como base o modelo ITU-R 526 com a inclusão de informação quanto às alturas efetivas de instalação das antenas transmissoras e receptoras em função do perfil topográfico. O modelo é dado por:

$$PL_{vale} = FSPL(f) + L_D + k\log_{10}(H_{eff}) \quad (2.5)$$

Onde k é constante de calibração e H_{eff} é a altura da efetiva da antena. O cálculo de L_D e detalhamento de H_{eff} pode ser visto em Almeida *et al.* (2017).

Entretanto, gerou ferramenta de predição MiningWIO, alimentada com modelo gerado a partir de dados empíricos, obtidos por meio de *site surveys* em minas da Vale.

2.3. Radio Environment Map

O desenvolvimento da ferramenta proposta neste trabalho é uma contribuição à construção do REM (*Radio Environment Map*) das operações autônomas da Vale. Em Zhao *et al.* (2009) o conceito de REM é definido como uma abstração do ambiente de rádio, na forma de uma base de dados espaço-temporal, reunindo múltiplos domínios daquela rede, como aspectos geográficos, capacidade dos equipamentos de rádios que a compõem bem como característica das emissões de rádio frequência. Essa base de dados pode ser explorada para suportar atividades

de planejamento, implantação e manutenção naquela rede. Ainda segundo Zhao *et al.* (2009), o REM pode também ser visto como uma extensão do *Available Resource Map* (ARM), que se propõe a ser uma mapa em tempo real de todas as atividades de rádio nas aplicações de rede. A Figura 2.8 mostra estrutura analítica de clientes que provêm dados (identificados como *Measurement Capable Devices*), unidade de aquisição e armazenamento, gerenciador e usuários do sistema.

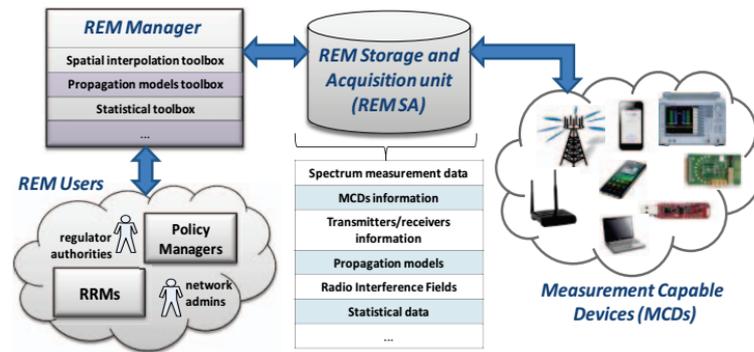


Figura 2.8: Estrutura Analítica dos componentes de um REM Denkovski *et al.* (2012).

No trabalho apresentado por Yilmaz Birkan *et al.* (2013) é acrescentado que deve ser requisito para o REM a função de prover dados confiáveis e atualizados que permitam manter a regularidade do fornecimento de serviços aos chamados usuários primários - aqueles que são clientes finais daquela rede de comunicação. Para atender à estes requisitos o REM pode ser construído periodicamente ou sobre demanda, em frequência de amostragem suficiente para capturar o comportamento dinâmico daquela rede. Embora o conceito de construção de um REM seja amplo, as técnicas de construção presentes na literatura se encaixam em duas classes: métodos baseados em estatísticas espaciais e métodos baseados na determinação da localização do transmissor. Estes métodos também são chamados de métodos diretos ou indiretos, respectivamente.

O método direto descreve as propriedades estatísticas de determinada área utilizando estruturas espaciais correlacionais daquela região. Utilizando características espaciais e ainda dados provenientes de medições de pontos específicos, áreas que não possuem medidas podem ter dados obtidos a partir de correlações com os valores medidos. Esta estimativa é baseada no princípio que localizações próximas geograficamente são mais relacionadas entre si do que quando comparadas a outras mais distantes. São técnicas de estimação existentes na literatura o *Kriging*, *IDW* (sigla em inglês para *Inverse Distance Weighted*) e interpolação por vizinho mais próximo. O *Kriging*, em especial, foi inicialmente utilizado em atividades correlatas à exploração mineral e basicamente utiliza ponderação para os pontos de forma a encontrar o valor estimado de um ponto de interesse p , onde os pesos são soluções de um sistema de equações lineares que minimizam os erros da predição.

Já os métodos indiretos ou métodos baseados em localização do transmissor necessitam que já existam dados disponíveis, medidos dos clientes, ou medidas que sejam aproximadas.

Primeiramente, o método foca em localizar espacialmente os transmissores e, então, aplicando modelos de propagação, estima a força do sinal para cada localização desejada.

Quantificar a proximidade do REM em relação ao ambiente real de operação é possível e pode ser medido por meio de métricas de qualidade. Estas métricas podem ser avaliadas por meio de comparação entre o REM estimado e o verdadeiro REM. Uma das formas amplamente utilizadas para quantificar a similaridade entre a REM estimada e o real é realizar o cálculo da média do RMSE (sigla em inglês para *Root Mean Squared Error*) do RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) de cada ponto de um grid estabelecido na área de atendimento da rede Yilmaz Birkan *et al.* (2013). O cálculo do RMSE é realizado conforme 2.6:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(Ve_i - Vm_i)^2}{n}} \quad (2.6)$$

Onde Ve são os valores esperados (calculados pelo modelo) e Vm os valores medidos.

2.4. Protocolo SNMP

O protocolo SNMP (*Simple Network Management Protocol*) criado na década de 1980 possibilita o acesso à informações de agentes (dispositivos conectados à uma rede IP) de forma simples por meio de comandos de requisição de informações por “batelada”. A preocupação com a simplicidade é ressaltada no artigo de revisão da criação do protocolo, onde os autores citam expressamente a vontade de manter o protocolo simples mesmo após uma série de adequações para estender seu uso Case *et al.* (1989). O esquema de funcionamento do protocolo pode ser visto na Figura 2.9.

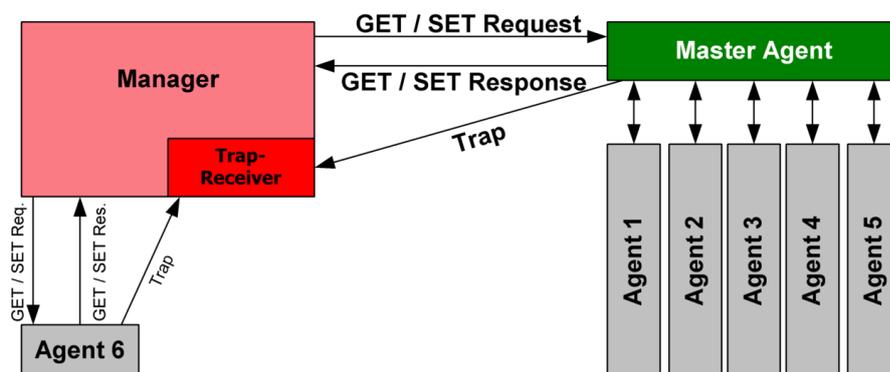


Figura 2.9: Esquema do princípio de funcionamento do protocolo SNMP.

No exemplo da Figura 2.9 são realizadas requisições de duas formas; uma com a existência de um “mediador” (*Master Agent*) e outra requisição feita diretamente a um agente (*Agent 6*). Na requisição realizada via *Master Agent* este continuamente realiza leitura de todos os dados dos agentes e responde por eles às requisições do tipo *GET / SET* feitas pelo Gerenciador (*Manager*). As informações armazenadas são então enviadas ao gerenciador. Exemplo deste tipo de configuração de solicitação de dados é a requisição feita à controladora de várias unidades de rádio. Já quando o agente SNMP é alvo da solicitação, este recebe diretamente as mensagens do tipo *GET / SET* do Gerenciador e o responde com os dados solicitados.

Outra funcionalidade disponível no protocolo é o envio de mensagens do tipo *Traps*; assim que determinadas condições são satisfeitas (*trigger*) uma mensagem é enviada ao gerenciador sem que este tenha realizado requisição de dados - tal como alarmes. Exemplos de mensagens de *trap* estão relacionadas a limites ultrapassados de temperatura ou de uso de memória do equipamento (alarmes relacionados ao hardware), bem como notificações operacionais, como geração de um alerta sempre que houver alteração da conectividade entre bases de um rádio cliente da aplicação.

2.5. Ferramentas Similares

Apesar do recente aumento da demanda por redes sem fio de alta qualidade em diversos setores industriais, em especial o da mineração, referências sobre trabalhos similares são escassas, considerando a execução de *site surveys* de forma automática, à distância e com alta precisão, além de plataforma de visualização em tempo real. Em Shanthi *et al.* (2013) é exposta a necessidade do ambiente de automação de mina prever serviços de infraestrutura de rede em tempo real, de forma a se adaptarem ao ambiente de mina, mutável.

Poucas ferramentas de mercado atentam para o nicho de monitoramento de aplicações de alto desempenho, aliando aspectos de qualidade de rede e georreferenciamento.

O trabalho desenvolvido na mina de Cerro Verde pela equipe local, onde um mapa em aplicação de supervisorio foi criado para expor dados relativos à qualidade da rede mesh além de substituir a rotina de *site surveys* Tejada (2016) atesta a falta de opções de ferramentas de mercado para atender ao nicho de clientes de rede móveis de forma georreferenciada. Nesta aplicação os dados são obtidos via protocolo SNMP que fornece os dados de rede como RSSI, SNR, Host Name, dentre outros. A frequência de amostragem utilizada para capturar estes dados foi de cerca de 1 Hz. Do sistema embarcado de aquisição de dados dos equipamentos foram extraídos os dados de posicionamento com amostras sendo capturadas em 0,5 Hz. As informações foram então armazenadas em um banco de dados e exibidos de forma gráfica em um mapa da região operacional da mina.

3. Metodologia Proposta

Características da Rede WIMAX de Brucutu

A mina de Brucutu opera, desde o início de 2019, uma frota de treze caminhões autônomos - e mais de uma centena de outros equipamentos auxiliares, que podem ser de produção ou não, que funcionam como entidades para o sistema. A frota opera integrada ao sistema produtivo da mina, que movimenta cerca de 70 milhões de toneladas de ROM por ano.

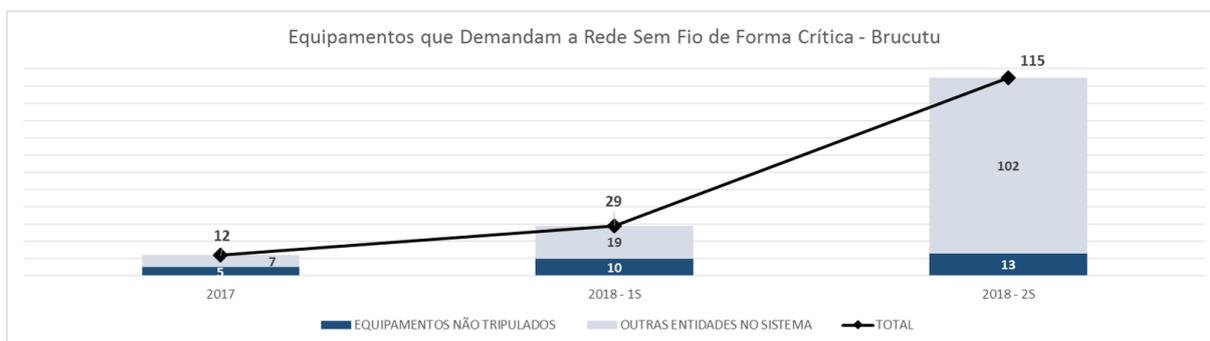


Figura 3.1: Evolução do número de equipamentos que vão demandar a rede de forma crítica em Brucutu.

A expansão da frota autônoma em 2019 trouxe novos desafios no âmbito de comunicação, aumentando a demanda por cobertura e confiabilidade da rede sem fio, que deve atender não apenas aos caminhões mas a todos os demais equipamentos que interagem com o sistema e precisam ser “enxergados” pelos caminhões para possibilitar uma operação integrada.

A Figura 3.1 traz uma consolidação da frota a ser coberta pela rede e a Figura 3.2 alguns requisitos dos links de comunicação de rede sem fio.

REQUISITOS DE REDE						
APLICAÇÃO	BANDA MÁXIMA - DL (Kbps)	BANDA MÁXIMA - UL (Kbps)	LATÊNCIA MÁXIMA* (ms)	JITTER MÁXIMO** (ms)	PERDA DE PACOTES**	
CAMINHÃO AUTÔNOMO	75	175	50	30	<1%	
TRATOR TELE-OPERADO	675	3825	100	30	<1%	
PERFURATRIZ AUTÔNOMA	380	3420	250	30	<1%	
SISTEMA RTK	19.2	-	5000	30	<1%	

(**) VALORES DE JITTER MÁXIMO E TOLERÂNCIA À PERDA DE PACOTES SÃO LIMITADOS PELOS ELEMENTOS DE REDE ENTRE AS "EXTREMIDADES" NAS APLICAÇÕES
 (*) A LATÊNCIA MÁXIMA NO SISTEMA RTK É DEFINIDA PELA APLICAÇÃO, QUE TOLERA DADOS DE CORREÇÃO COM "IDADE" MÁXIMA DE 5 SEGUNDOS

Figura 3.2: Requisitos de rede para as aplicações de tecnologia utilizadas na Vale.

O planejamento para a infraestrutura de rede prevê ainda o uso de onze pontos de acesso, destinadas a redes Mesh, por meio de unidades móveis (carretinhas) providas de mastro telescópico. A rede Mesh serve como apoio à aplicações correlatas aos equipamentos autônomos e contigência da rede WIMAX.

A mina de Brucutu, onde foram desenvolvidas as atividades propostas neste trabalho, possui uma arquitetura mista que contempla diversas tecnologias de rede sem fio, para atender aos diversos requisitos impostos pelos sistemas de informação existentes.

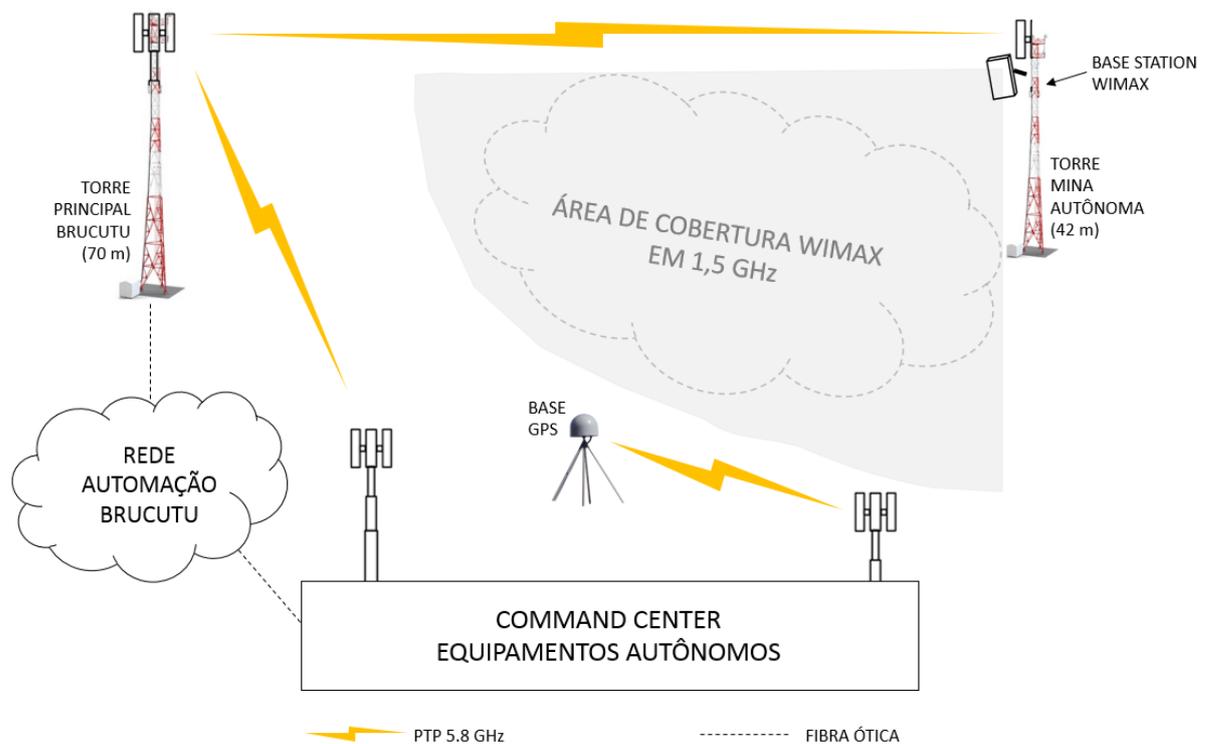


Figura 3.3: Topologia de rede existente na Mina de Brucutu (Maio, 2018).

Em Brucutu a rede WIMAX opera na frequência de 1,5 GHz em dois canais (1,432 GHz e 1,498 GHz). São utilizadas estações base RuggedMAX™ WiN7000 e a antena aplicada na torre da Mina Autônoma (Figura 3.3) é do tipo diretiva, com ganho de 16 dBi capaz de operar em valores de frequência entre 1,390 e 1,525 GHz. Esta antena é fabricada pela ALPHA WIRELESS e possui ângulo de irradiação de 90° na horizontal e 8° na vertical. A rede conta ainda com VLANs (sigla em inglês para Rede de Área local Virtual) com configurações de QoS (sigla em inglês para Qualidade de Serviço) para aumentar a confiabilidade nas aplicações de produção.

Etapas de Implantação do Trabalho

O processo de criação da ferramenta foi dividido em etapas, destacadas na Figura 3.4.

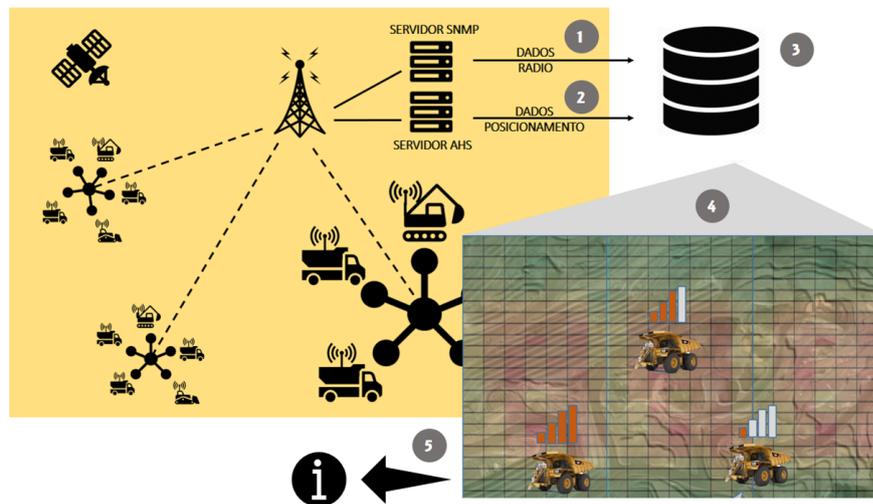


Figura 3.4: Etapas 1 a 5 do desenvolvimento do trabalho; da aquisição de dados à geração de informações para tomada de decisão.

- Etapa I - Dados da rede:** utilizando um servidor SNMP são lidos os dados de qualidade da rede em determinada localização, para um cliente (rádio embarcado). Estes dados são tratados e armazenados no banco de dados. O fabricante do equipamento capaz de comunicar via SNMP define quais informações estarão disponíveis às requisições do protocolo. Estas informações usualmente se referem ao hardware do equipamento (temperatura interna, uso dos processadores e memória, etc.) e aplicação daquele dispositivo. No caso de rádios, além de informações sobre o status do funcionamento do hardware, dados instantâneos como taxas de transmissão e recepção (em bits), força e qualidade do sinal recebido (RSSI, CNIR) são fornecidos - possibilitando o “*site survey* via SNMP”. A lista das variáveis e como acessá-las via SNMP estão mapeadas no arquivo *MIB* (*Management Information Base*) dos equipamentos e é disponibilizada pelo fabricante no lançamento e a cada atualização do *firmware*. Cada variável é endereçada por meio de uma chave

única, a OID (*Object Identifier*) e podem ser consultadas utilizando um software de *MIB browser*.

- **Etapa II - Dados de posicionamento:** utilizando dados do servidor que gerencia os caminhões autônomos, são obtidas as coordenadas geográficas dos caminhões e demais equipamentos que possuem sistema de GPS de alta precisão.
- **Etapa III - “Alinhamento dos dados” e armazenamento em banco de dados:** são correlacionados, baseando-se em seus respectivos *time stamps*, os dados provindos do servidor SNMP e do servidor que gerencia os caminhões. Teremos, então, para cada amostra colhida dos índices de qualidade de rede, um *time stamp* e uma coordenada associada.
- **Etapa IV - Utilização da base de dados gerada para tomada de decisão:** os resultados comparativos entre *site surveys* gerados no trabalho de Almeida *et al.* (2017) serão revisitados. Neste trabalho Almeida *et al.* (2017) realiza um estudo de predição de rede, utilizando-se do mapa de Brucutu e de modelo desenvolvido pelos autores, (*Vale Model*) com aplicação específica para minas de ferro a céu aberto. Serão comparados aos resultados obtidos de *site surveys* gerados por meio da ferramenta proposta neste trabalho, utilizando o RSME para quantificação dos resultados da comparação com as predições do *Vale Model*. Desta forma, além de nova prova de validação, será acrescentada à base de comparação mostrada em Almeida *et al.* (2017) a frequência de 1,5 GHz utilizada pela rede WiMAX de Brucutu. Também serão apresentados casos de uso da ferramenta, que vem sendo aplicada de forma operacional em Brucutu.
- **Etapa V - Tela sinótica:** com base nos dados de qualidade da rede e posicionamento será possível criar uma projeção sobre o mapa da área de operação. Este mapa pode ser dividido em micro-regiões, onde a cada qual será atribuído um valor referente à “nota” da rede neste ponto. O mapa de n microregiões pode ser representado por uma matriz onde cada termo representa o índice I no instante t_i :

$$\begin{vmatrix} C_{1,1,t_i} & C_{1,2,t_i} & \dots & C_{1,n,t_i} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{n,1,t_i} & C_{n,2,t_i} & \dots & C_{n,n,t_i} \end{vmatrix}$$

Dessa forma, é possível alterar a cor daquela micro-região na ferramenta gráfica, indicando na forma de *heatmap* o status da rede na região de tráfego.

Apresenta-se, ainda, possibilidades de criar diagnósticos em áreas de futura necessidade de rede, alimentando a ferramenta com dados provenientes de *site surveys* realizados em veículos terrestres dotados dos equipamentos de recepção e transmissão equivalentes.

- **Etapa VI - Encapsulamento das funcionalidades em ferramenta própria:** Etapa constitui na especificação de requisitos e desenvolvimento de ferramenta que irá consolidar as

etapas de 1 a 5 em ferramenta própria e encapsulada, a fim de contribuir com a confiabilidade e escalabilidade da aplicação.

Dentre as etapas descritas, serão desenvolvidas pelo autor as etapas 1, 2, 3, 4 e 5. Neste trabalho serão documentadas as etapas de 1 a 4. A ferramenta descrita nas etapas 5 e 6 serão desenvolvida com auxílio de empresa contratada para suporte técnico ao projeto no âmbito de telecomunicações, sob orientação do autor.

As etapas de 1 a 3 se referem a obtenção de dados de campo, que serão descritas a seguir, neste capítulo. Serão apresentadas também as metodologias de validação destes dados. No Capítulo 4, de demonstração e discussão dos resultados, será apresentada a etapa 4 do trabalho.

3.1. Método para Obtenção e Validação dos Dados

A seguir é descrito como foram obtidos e validados os dados relativos à qualidade de rede e ao posicionamento dos equipamentos.

3.1.1. Etapa I.1 - Obtenção de Dados da Rede

A primeira ação para iniciar o processo de coleta via SNMP é realizar a configuração dos rádios clientes para receberem mensagens de *GET* e *SET* de um determinado servidor SNMP, desde que ambos estejam no mesmo domínio de rede. Esta ação, no caso dos rádios clientes WiMAX modelo SIEMENS WIN5100, é executada acessando as configurações do rádio via web. O servidor SNMP apontado foi o servidor utilizado para testes do projeto e está configurado com o IP 10.2.70.150. Este IP é referenciado na configuração do rádio, conforme Figura 3.1.1. São também definidos os nomes da *community* para leitura e escrita nos campos passíveis deste acesso via SNMP.

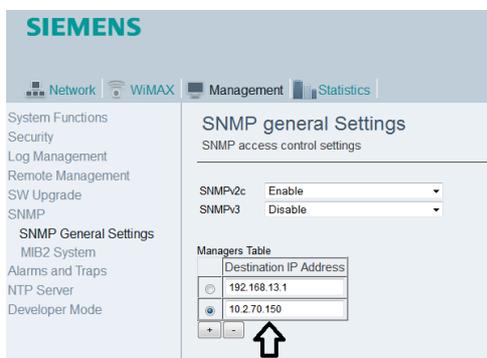


Figura 3.5: O servidor SNMP é apontado no cliente.

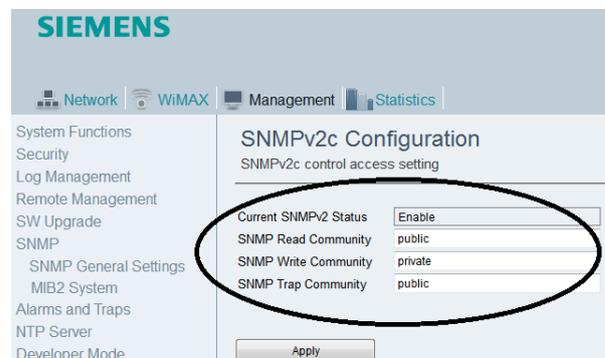


Figura 3.6: É necessário definir as *communities* de acesso.

Os rádios empregados utilizam a segunda versão do protocolo SNMP, por isso estão descritos os campos como SNMPv2.

Uma vez configurados os rádios é realizado o mapeamento das OIDs das variáveis de interesse por meio da pesquisa na MIB do rádio. Para que a pesquisa funcione é necessário que previamente seja carregado arquivo de configuração da MIB em um software capaz de navegar dentre as variáveis disponíveis. O conjunto de variáveis disponíveis é chamado de “árvore MIB” onde cada ramo contém família de variáveis relacionada a um tópico, como por exemplo, ramo com variáveis relacionadas à saúde do hardware do rádio. E cada folha é a variável, identificada pelo seu OID único.

Existem muitas opções de mercado de softwares que são capazes de percorrer uma árvore MIB. Foi utilizado um software de distribuição e uso livres (MIB Browser) para pesquisar as OIDs correspondentes às variáveis de interesse: RSSI e CINR.

O RSSI, (*Received Signal Strength Indicator*), é uma medida de quão bem o dispositivo está recebendo dados do ponto de acesso e está relacionado com a intensidade (potência) do sinal recebido. Trata-se de um valor relativo, medido em escala logarítmica, com unidade em dBm, onde 0 dBm representa 1 mili Watt. As perdas na propagação do sinal (visto no Capítulo 2) e das conexões em cabos e antenas são deduzidas do valor de potência transmitido e os ganhos promovidos pelas antenas de transmissão e recepção, somados. A referência é útil para determinar a intensidade da conexão sem fio, requisito para que a conexão entre rádios transmissor e receptor seja estabelecida. Para a aplicação do sistema autônomo o valor de referência considerado como mínimo para que se estabeleça uma conexão é de -75 dB.

Já o O CINR (*Carrier para Interference + Noise Ratio*), é basicamente “relação sinal-ruído”, medida também em unidade logarítmica e representada em dB. Ter o CINR adequado significa ter um sinal com proporção de sinal “útil” maior que o sinal interpretado como ruído naquele ambiente.

Na Figura 3.7 é identificada a OID correspondente às duas variáveis.

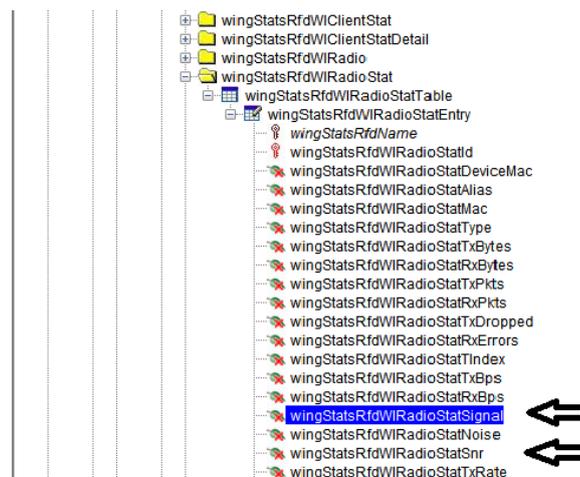


Figura 3.7: MIB Browser com os as variáveis de RSSI e CINR disponíveis para leitura.

As OIDs referentes aos valores instantâneos de RSSI e CINR para o rádio WiMAX foram então registradas:

Item	OID SIEMENS WIN5100
RSSI	.1.3.6.1.4.1.15004.4.10.2.4.3.6
CINR	.1.3.6.1.4.1.15004.4.10.2.4.3.2

Tabela 3.1: OIDs para RSSI e CINR - SIEMENS WIN5100.

3.1.2. Etapa I.2 - Validação dos Dados da Rede

Registrados os OIDs, foi verificado se os valores das variáveis capturados via SNMP correspondiam aos indicados pelo rádio. Foi utilizado mais uma vez o acesso web ao rádio, que fornece os valores em tempo real de alguns parâmetros, dentre eles o RSSI e CINR, mostrados na Figura 3.8.

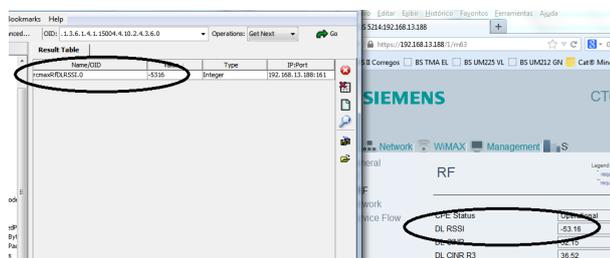


Figura 3.8: Valores lidos via SNMP são confrontados com os valores fornecidos pelo rádio.

A verificação foi feita avaliando os valores de RSSI em um mesmo instante, conforme a Figura 3.8 e se mostrou precisa.

Para obter a coleta de dados em amostragem contínua foi utilizado outro software de distribuição e uso livre, o Paessler SNMP Tester, que é capaz de enviar solicitações de leitura com amostragem máxima de 1 Hz - frequência de amostragem alta o suficiente para monitorar os veículos que trafegam na mina, que tem velocidade máxima de aproximadamente 60 km/h (caso dos caminhões) enquanto os demais veículos tem velocidade limitada por regras de tráfego em 40 km/h. Portanto, no pior caso, a taxa de amostragem de 1 Hz nos dará amostras espaciais com 16,7 metros entre si.

O coletor é de fácil configuração - os campos de entrada são o IP e porta do cliente SNMP que deseja obter as medidas, versão de SNMP a ser utilizada, qual comunidade de leitura acessará as variáveis e, finalmente, qual OID será acessado. Na Figura 3.9 é possível ver um processo de coleta, sendo realizado a cada 2 segundos, de valor de RSSI.

Ainda na Figura 3.9, nota-se que os resultados das requisições são exibidos em painel a direita, mas também geram arquivo de texto, em tempo real, contendo o dado “bruto”. Os resultados possuem *Time Stamp*¹, com precisão de segundo em ambas as saídas.

¹Todos os servidores no ambiente de automação do projeto, incluso os servidores de aplicação dos caminhões autônomos, utilizam sincronização de relógio nativa do windows, que utiliza um apontamento para um servidor do ambiente para ser o “mestre” o qual terá seu relógio utilizado como balizador para todos.

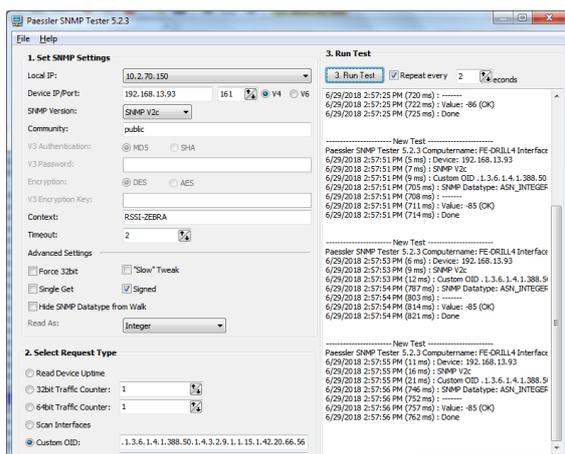


Figura 3.9: Coletor de pacotes SNMP configurado para buscar a cada 2 segundos dado de RSSI.

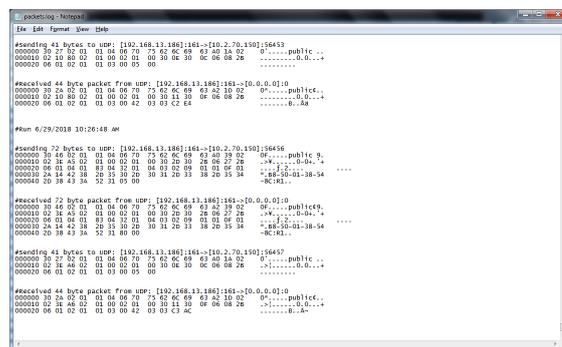


Figura 3.10: Resultados “crus” da saída do coletor; pacote SNMP em resposta a um GET de OID de RSSI.

3.1.3. Etapa II.1 - Obtenção de Dados de Posicionamento

Os dados de posicionamento do sistema autônomo são disponibilizados no formato UTM utilizando o Datum SAD69 e podem ser obtidos de duas formas. A primeira pelo sistema de gerenciamento dos caminhões autônomos (módulo do Caterpillar MineStar, o *Command for Hauling*) por meio de arquivos chamados de *Positioning Reports*, que armazenam, a cada segundo, várias propriedades, incluindo a posição de todos os equipamentos (autônomos ou não) que estão cadastrados no sistema e circulam na área da mina. Estes arquivos possuem formato binário e proprietário e só podem ser extraídos via software da Caterpillar, que permite a exportação no formato tsv (*tab-separated values*). Esta limitação dificulta a implantação de ferramenta que necessite acessar as informações utilizando este meio de obtenção dos dados.

A segunda forma de obtenção dos dados de posicionamento é realizando consulta no banco de dados SQL - este sim, aberto e disponível. Entretanto, os dados disponíveis desta forma possuem duas limitações: 1) a taxa de amostragem não é fixa e varia de 2 segundos até 8 segundos, em média e 2) os dados dos caminhões autônomos não estão disponíveis.

Apesar das limitações, para a aplicação de análise de rede, os dados disponíveis via banco de dados são suficientes para avaliação em tempo real. Durante as coletas realizadas a amostragem, mesmo que não tenha taxa fixa, cobre a área de tráfego de forma satisfatória se coletada durante tempo suficiente, uma vez que a forma de condução veículos da mina apresentam comportamento cíclico, percorrendo repetidamente as áreas de atuação da frota. O fato do banco também não conter informações sobre os caminhões tampouco apresenta sérias limitações ao estudo da cobertura de rede, uma vez que o equipamento que constitui no pior caso para recepção de sinal é a camionete utilizada pelas equipes de campo, devido à baixa altura de instalação da antena. O posicionamento da antena, em relação à altura de instalação, se mostrou relevante empiricamente e é discutido em estudo realizado por Almeida *et al.* (2017).

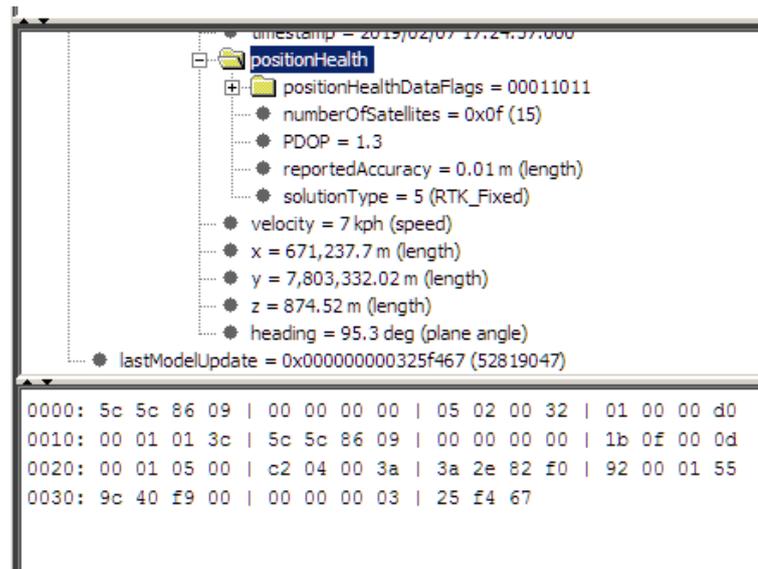


Figura 3.11: Dados de posicionamento do sistema de caminhões autônomos - coordenadas no formato UTM.

Adicionalmente vale salientar, para a primeira fase de desenvolvimento deste trabalho, onde não há necessidade de obtenção dos dados em tempo real, a obtenção dos dados de posicionamento via software Caterpillar é mais adequada, uma vez que o processo de pesquisa e exportação dos dados não leva mais que 10 minutos e fornece dados com frequência de amostragem constante (1 Hz), o que facilita o processo de “alinhamento” com os dados da qualidade de rede coletados via SNMP. Além disso, por conterem também os dados dos caminhões, irão permitir análise comparativa entre os diferentes tipos de equipamentos. Os resultados exibidos adiante neste trabalho se valeram desta ferramenta para obter os dados de posicionamento.

3.1.4. Etapa II.2 - Validação dos Dados de Posicionamento

Para que os dados de posicionamento forneçam informações confiáveis ao serem sincronizados com as informações provenientes via SNMP é necessário que as coordenadas informadas estejam, de fato, representando a realidade. Para realizar a certificação da confiabilidade destes dados foi realizada conferência da configuração da base de correção e comparação entre os dados do relatório de posicionamento do sistema dos caminhões autônomos com medições em campo utilizando *rover* de topografia. Os produtos envolvidos nesta verificação são identificados pelas letras A, B e C no infográfico da Figura 3.12.

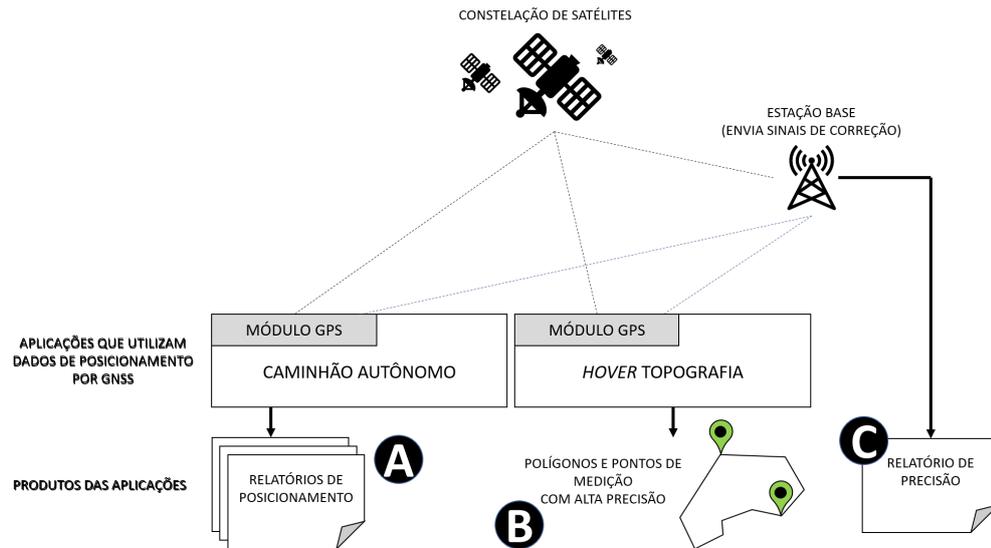


Figura 3.12: Infraestrutura responsável pela obtenção, tratamento e alguns usos dos dados de GNSS no sistema AHS.

Os dados utilizados efetivamente para alimentar a ferramenta apresentada neste trabalho são provenientes dos relatórios de posicionamento do sistema AHS, identificado pela letra A na Figura 3.11, e que estão sujeitos à precisão garantida pela base de correção, que fornece os relatórios de precisão identificados pela letra C no infográfico da Figura 3.12 e mostrados abaixo, na Figura 3.13.

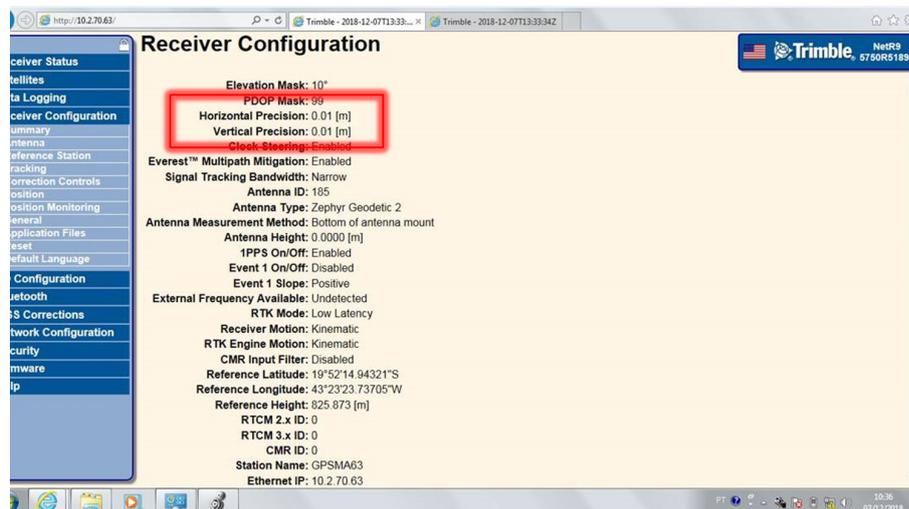


Figura 3.13: Relatório de configuração da base de correção: configuração de erro mínimo de 0.01 metro

Uma vez que o sistema de caminhões autônomos está totalmente implementado e funcional, é razoável considerar que o sistema de posicionamento de alta precisão seja confiável. Entretanto, a eventual existência de erros em pequena escala podem ser ignorados pelas maior tolerância envolvida em atividade como locomoção e interação entre os equipamentos autônomos

- caminhões de grande porte. Abaixo, na Figura 3.14, é mostrada a precisão dos equipamentos utilizando apenas suas próprias antenas GNSS para obtenção das coordenadas. Fica então evidente a necessidade de se realizar a correção; a coluna “Precisão” fornece o valor de erro dos dados de posicionamento do sistema de GPS local antes de receber a mensagem de correção. Embora a maioria dos equipamentos não necessitaria de correção para operar em área autônoma, pois o sistema AHS tolera erro de até 0.02 metro, é possível notar divergências superiores a 1 (um) metro. A coluna “Latência” informa a “idade” da mensagem de correção, que deve ser menor que 5 segundos.

Machine (Máquina) ▲	Tempo de Chegada	Latência	Precisão	Motivo	Infra
BBC0689	2019/01/15 10:39:57	3,5 s	0,01 m	Indefinido	
BBC5262	2019/01/15 10:47:05	2,9 s	1,07 m	Atualização Periódica	
BBC5286	2019/01/15 10:49:53	2,74 s	0,01 m	Alteração de Posição da Máq...	
BBC6597	2019/01/15 10:51:34	2,83 s	0,01 m	Alteração de Posição da Máq...	
BTU-TP5			0,1 m		✓
CA5812			10 m		
CA5817			10 m		
CA5922			10 m		
CA5925			10 m		
CA5926			10 m		
CA5927	2019/01/15 10:51:32	-1,42 s	Sem Fixar		
CA6001	2019/01/15 02:37:26	1,45 s	Sem Fixar	Mudança na Curvatura do P...	
CA6002	2019/01/15 10:42:29	2,13 s	Sem Fixar	Atualização Periódica	
CA6003	2019/01/15 10:51:34	2,17 s	0,02 m	Atualização Periódica	
CA6004	2019/01/15 10:51:34	2,19 s	0,02 m	Atualização Periódica	
CA6005	2019/01/15 10:51:34	2,17 s	0,02 m	Atualização Periódica	
CA6006	2019/01/15 10:51:34	2,21 s	0,02 m	Atualização Periódica	
CA6007	2019/01/15 10:51:34	2,31 s	0,02 m	Atualização Periódica	
CA6011	2019/01/15 10:51:35	2,37 s	0,01 m	Atualização Periódica	
CA65901	2019/01/15 10:51:34	2,75 s	0,01 m	Alteração de Posição da Máq...	
CA65909	2019/01/15 10:51:31	0,65 s	Sem Fixar		
CB7369	2019/01/15 10:51:34	2,67 s	0,01 m	Alteração de Posição da Máq...	
CB7372	2019/01/14 23:56:02	2,62 s	0,71 m	Alteração de Posição da Máq...	

Figura 3.14: Relatório de precisão do sistema autônomo: erros de até 1.07 metros no sistema GNSS convencional tornam o sistema de correção necessário.

Também foi realizado teste para levantar a precisão da conversão de coordenadas do formato UTM (coordenadas x e y) utilizando datum SAD69, que é a forma que o banco de dados do sistema autônomo disponibiliza as informações de posicionamento, para coordenadas em formato geodésico decimal (latitude e longitude) em datum WGS84, formato mais difundido e, portanto, mais adequado para uso em ferramentas de mercado, como o Google Earth. Para tal foram coletados e convertidos dados de posicionamento de camionete pela ferramenta. Estes dados foram comparados com dados medidos no mesmo local por um *rover* que já fornece dados convertidos em formato geodésico decimal no datum WGS84. Para que fossem medidos em mesmo local, as antenas dos equipamentos - *rover* e camionete - foram colocadas “empilhadas” no momento da medição, conforme Figura 3.15.



Figura 3.15: Antenas foram colocadas sobrepostas para que as coordenadas fossem comparada.



Figura 3.16: O coletor realiza medições e exibe os dados convertidos em diversos formatos de coordenadas.

Os dados da antena da camionete foram colhidos utilizando os relatórios do sistema e convertidos usando a ferramenta desenvolvida. Após comparados os valores convertidos pelo *rover*, mostrado na Figura 3.16, o erro foi medido em cerca de 2 centímetros, considerado aceitável dada a metodologia aplicada.

Foram considerados, portanto, aceitos os “elementos principais” da ferramenta desenvolvida: dados de rede e de posicionamento. Tornam-se válidos, desta forma, os resultados numéricos que orientam os objetivos deste trabalho de criação de site surveys “automáticos” e uso dos dados destes para nova validação do modelo de propagação Vale.

3.1.5. Etapa III - Correlação e Armazenamento

Uma vez capturados os arquivos de dados de rede e de posicionamento, estes alimentam ferramenta de sincronização e armazenamento desenvolvida em *Visual Basic for Applications* (VBA) que é executada em Excel e realiza a manipulação dos dados, sincronização das mensagens e geração do arquivo em formato capaz de ser lido em aplicações como o Google Earth.

A ferramenta permite que sejam manipulados arquivos de rede e posicionamento com até 10 mil pontos de coleta (aproximadamente 5h30 de coleta amostrando a cada 2 segundos). O processo de manipulação é descrito a seguir.

Etapa III.1 - Importação dos arquivos

A ferramenta exibe janela (Figura 3.17) que permite que se navegue no diretório para obter o caminho de rede como parâmetro de entrada para leitura dos arquivos. São escolhidos os arquivos TSV (*Tab-Separated Values*), de posicionamento, e os arquivos com os dados de saída do coletor de dados SNMP, no formato de texto.

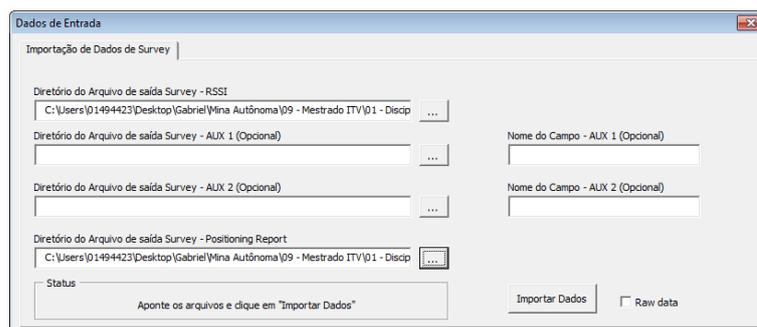


Figura 3.17: Janela para seleção dos arquivos de entrada.

Além dos dados de entrada de RSSI e de Posicionamento, é possível importar valores de coleta de outros arquivos contendo parâmetros de rede e que estejam no mesmo formato do coletor de dados SNMP para que sejam correlacionados aos dados de RSSI, como razão sinal ruído (CINR) e informação de qual célula se está conectado naquele instante, por exemplo.

Etapa III.2 - Sincronização dos Dados e Exibição de Resultado Parcial

Uma vez indicados os arquivos, o código executa funções que importam o conteúdo dos dados para a planilha em Excel e realiza a sincroniza, utilizando o *Time Stamp* como chave para “alinhamento”. É percorrido todos os dados de coleta de rede, que normalmente possui menor quantidade de dados, devido à amostragem usualmente utilizada de 0,5 Hz frente aos dados coletados a cada segundo de posicionamento. Os dados de rede que contém correspondente em *Time Stamp* com posicionamento são chamados então de dados válidos. Para todos os dados válidos são manipulados os valores de x , y e z que representam as coordenadas no

formato UTM e datum SAD69 que são convertidas para o formato geodésico decimal (latitude e longitude) representados no datum WGS84. Conforme IBGE (2005), os parâmetros da Tabela 3.2 de transformação WGS 84/SAD 69, divulgados através da Resolução n 1, de 25/02/2005 (R.PR 01/05), são válidos para transformar coordenadas entre SAD 69/WGS 84 e SAD 69/SIRGAS2000 determinadas por posicionamentos GNSS realizados após 01/01/1994, ambos as coordenadas em UTM:

DX	+67,35 m
DY	+3,88 m
DZ	-38,22 m

Tabela 3.2: Parâmetros WGS 84 (SIRGAS2000) para SAD69

Uma vez finalizado este processo é possível visualizar, na tela principal da ferramenta, o gráfico do valor de RSSI em dBm ao longo do período de coleta, conforme mostrado na Figura 3.18:

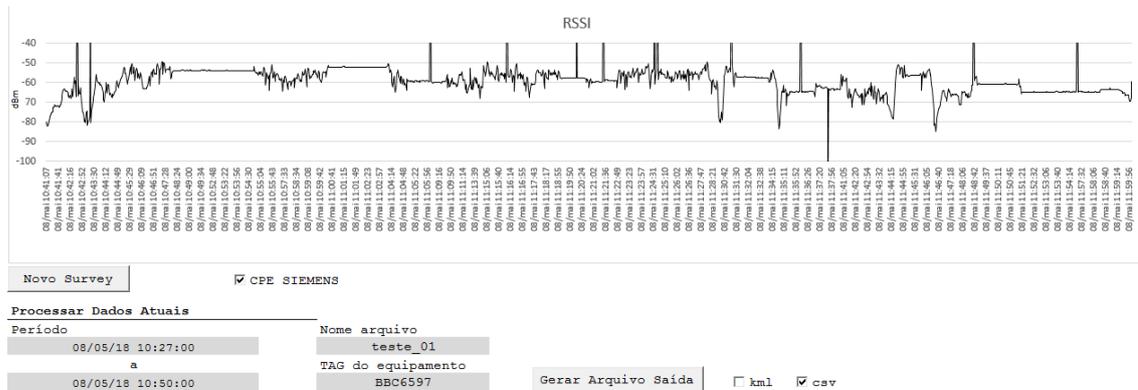


Figura 3.18: Tela Principal da Ferramenta exibindo gráfico de RSSI com todos os dados válidos.

Etapa III.3 - Escolha do Período para Geração dos Arquivos de Saída

É possível, já com base nas informações do gráfico de RSSI x *Time Stamp*, ter informações sobre o *site survey* de forma geral, uma vez que é possível saber, por exemplo, se os valores de RSSI ultrapassaram um limite estipulado como mínimo aceitável para a aplicação em questão. Soma-se ainda o fato de que os dados, por possuírem horário da coleta (eixo *x*), contêm informação relacionada ao local onde o veículo trafegou, associando os locais de atendimento daquele equipamento com o horário daquele dado. O gráfico também oferece informação quanto ao período que será utilizado para ter os dados exportados para o Google Earth, ferramenta que normalmente é utilizada para ler os dados em mapa.

Nos campos da parte inferior da ferramenta (Figura 3.18) é possível determinar os horários de “corte” para estabelecer o período que o arquivo de saída (formato csv ou kml) será exportado. Ao se clicar no botão de “Gerar Arquivo de Saída” é aberta janela de diálogo para escolher nome e local onde será salvo arquivo no formato desejado, escolhido por meio de *check boxes*.

4. Resultados e Discussões

Neste capítulo continuará a ser utilizada a estrutura de etapas descrita no Capítulo 3 para orientar a demonstração dos resultados obtidos, contidos na quarta etapa do trabalho.

4.1. Etapa 4 - Utilização dos dados para tomada de decisão

O contexto operacional em uma mina com equipamentos autônomos exige da equipe de telecomunicações uma participação direta na estratégia de exploração das frentes de lavra. É necessário saber de antemão a existência e a qualidade do sinal de rede em uma área antes de iniciar o tráfego de equipamentos naquela região. Fatores como disponibilidade de recursos de exploração bem como a heterogeneidade da qualidade do minério fazem, contudo, que a decisão do local a ser explorado possa ser revista várias vezes ao dia. E a cada nova reconfiguração - física ou lógica - dos transmissores, se faz necessário, idealmente, novo emprego do processo de *site survey* na região de interesse, embasando as decisões quanto à operacionalização da área. Do contrário, ajustes podem ser requeridos durante a operação, prejudicando o desempenho do sistema.

No curto prazo, quando o local a ser avaliado já existe e é operacional, o *site survey* é o método mais rápido e usual para avaliação da capacidade de rede do local. Já no caso de planejamento áreas de interesse no médio e longo prazo, o uso de ferramentas de predição é a solução para avaliação daquela configuração de projeto.

As seções a seguir demonstram a utilidade dos dados gerados pela ferramenta proposta em ambas aplicações citadas: na criação ágil de *site surveys* e na validação de modelo de predição.

4.1.1. Etapa 4.1 - Site Survey

Uma vez exportados os arquivos pela ferramenta, estes podem ser lidos pelo Google Earth para auxiliar a tomada de decisão quanto à infraestrutura de rede que atende aquele local. A Figura 4.1 mostra um resultado de *site survey* gerado a partir de coleta de dados de uma camionete (equipamento de pequeno porte). O período foi escolhido por ter valores menores que a média, considerando todo o período de coleta mostrado na Figura 3.18 - corresponde ao intervalo entre 11:30 e 11:50 do dia 08 de Maio de 2018.

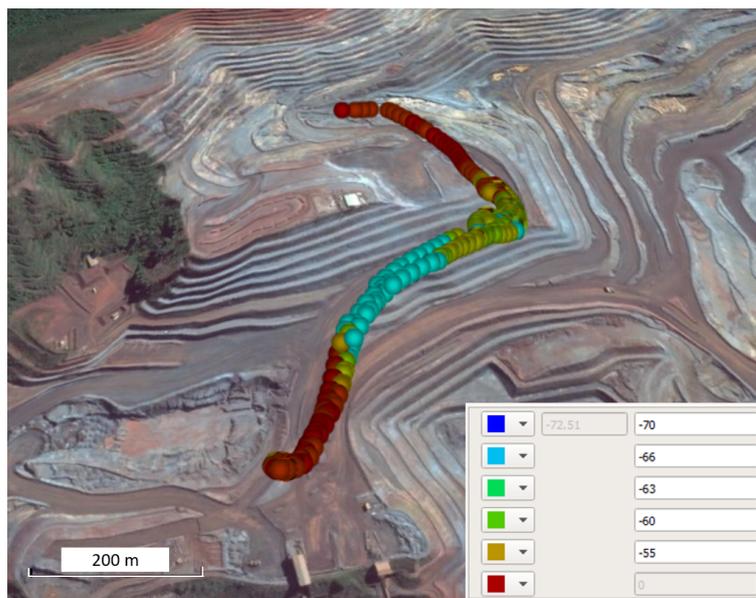


Figura 4.1: Resultado do *site survey* no intervalo entre 11:30 e 11:50. A escala de cores representa valores de dBm, mostrados nos rótulos de dados na própria imagem.

Em relação as cores utilizadas na escala de RSSI é de praxe utilizar “cores quentes” (vermelho, laranja) para indicar regiões com alta intensidade de sinais e “cores frias” (azul, violeta) para demonstrar que a região não possui boa cobertura em relação ao indicador, formando um *heatmap*. Na Figura 4.1 os pontos exibidos em azul claro correspondem à região com menor qualidade de sinal (RSSI com valores inferiores a -66 dBm) e corresponde à região conhecida por ser local onde há ocorrência de perdas de sinal temporariamente em alguns equipamentos. Apesar do valor de RSSI entre -76 e -78 dBm não ser considerado um valor crítico frente aos requisitos de rede do sistema autônomo, a queda de qualidade do sinal nesta região pode levar à perda de conexão caso o equipamento que ali trafegue contenha elementos estruturais do sistema de rede que imponham perda adicional de potência como, por exemplo, conectores oxidados.

Informações detalhadas do ponto de coleta podem ser vistas clicando no ponto, conforme Figura 4.2.

Atualmente a ferramenta já tem sido utilizada pela equipe de telecomunicações para verificar alterações provocadas por mudanças realizadas em parâmetro da rede, com survey realizados antes e depois das alterações.

A medida que a equipe de telecomunicações faz uso da ferramenta, melhorias são realizadas baseadas nas necessidades específicas do time. Um exemplo de implementação sob demanda foi o atendimento à solicitação de se obter dados relativos a outra rede existente no site (rede de topologia mesh que funciona como contigência da rede WiMAX com cerca de 12 pontos de acesso espalhados pela mina). Era necessário, ainda, saber em qual das células estava conectado o rádio cliente a medida que este se deslocava pela área de interesse e, ainda, como se trata de rede *mesh*, qual era a célula que representava o próximo “salto” de conexão do equipa-

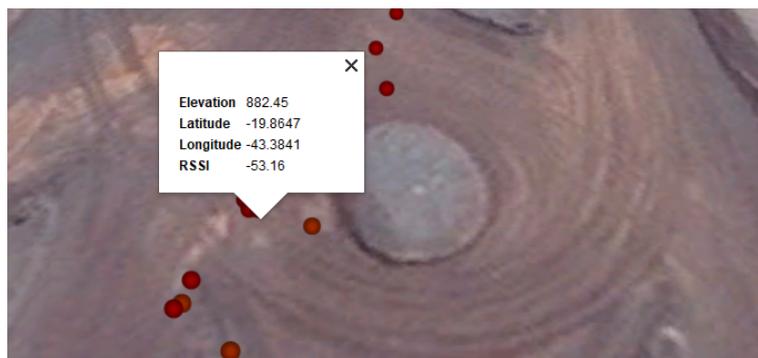


Figura 4.2: Resultado do *site survey* no intervalo entre 11:30 e 11:50. A escala representa valores de dBm.

mento (*Next Hop*). Para atender a esta demanda, bastou verificar qual *OID* era responsável por reportar a qual célula o cliente estava conectado e monitorar esta variável durante o *site survey*. Após exportado o mapa, o ícone para cada medição foi alterado para representar a conexão com a célula correspondente, como mostrado na Figura 4.3.



Figura 4.3: Site survey contendo informações referentes a qual célula o cliente estava conectado no momento; cada letra representa uma célula da rede mesh. A funcionalidade de representar a atual conexão foi adicionada sob demanda.

Em outras oportunidades, outros dados foram monitorados sob demanda: RSSI medido na célula referente ao sinal de *retorno* do cliente, porcentual de memória RAM ocupada do cliente (investigava-se, à época, razões para possível “travamento” de equipamentos de rádio), dentre outros. Fica claro o potencial de aplicação do método, se associado a uma ferramenta que permita que se “navegue” nas variáveis disponibilizadas pelo fabricante do equipamento via SNMP.

4.1.2. Etapa 4.2 - Validação do Modelo Vale de Propagação

Um dos propósitos do trabalho foi realizar a validação modelo Vale, que fora desenvolvido em 2017 e, na oportunidade, se mostrou eficiente para prever a perda de propagação de um sinal em uma mina de minério de ferro a céu aberto. A validação foi realizada de duas formas; qualitativa e quantitativa. A primeira validação, de forma visual, utilizou predição gerada por software de predição de rede carregado com o *Vale Model*, que representa graficamente a qualidade da rede em um mapa tridimensional ¹. O mapa foi comparado aos resultados de survey coletados em campo. A predição mostrada na Figura 4.4 destaca região onde foi constatada queda na força do sinal pelo *site survey* mostrado na Figura 4.1.

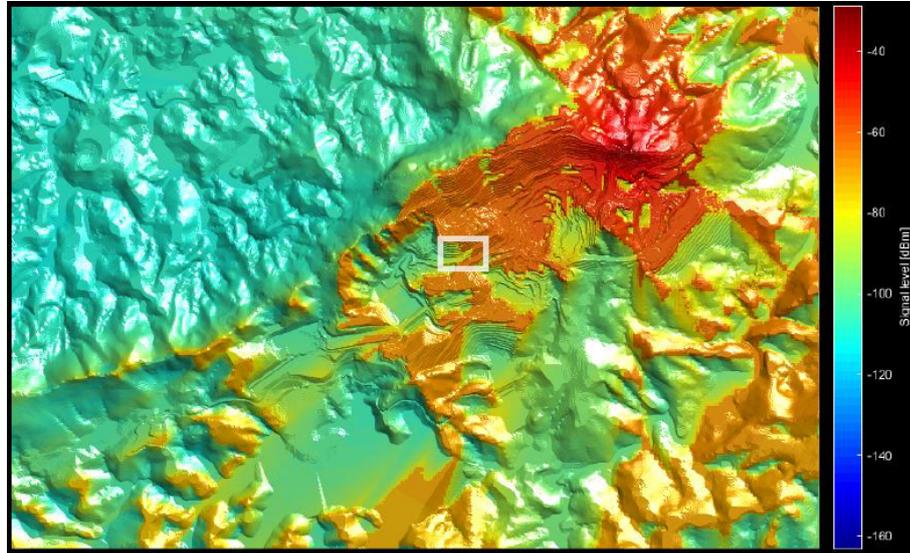


Figura 4.4: Resultado da Predição para o WiMAX em Brucutu.

¹Para geração do mapa tridimensional o software de predição utiliza dados provindos de uma nuvem de pontos que são obtidos por veículos aéreos não tripulados (VANT), que sobrevoam a mina periodicamente com um intuito de realizar levantamentos topográficos de toda a área de influência do empreendimento. Estes dados são utilizados, dentre outras aplicações, para orientar o planejamento de lavras, auxiliar no desenvolvimento de estruturas de acesso da mina bem como alimentar ferramentas de análise.

A Figura 4.5 exibe a localização com maior detalhe e permite verificar que, conforme já era sabido graças aos dados de predição, o local sofreria uma perda de qualidade de sinal naquele ponto quando comparada às regiões vizinhas.

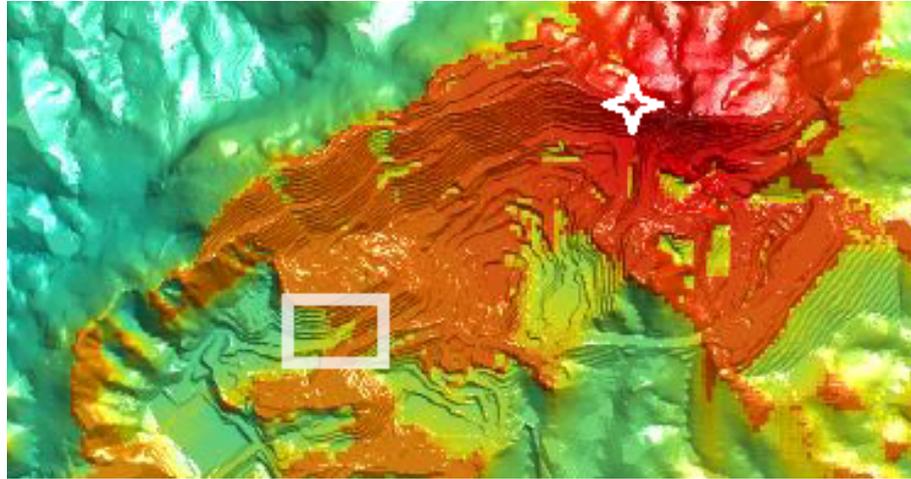


Figura 4.5: Detalhe da predição: destaque corresponde à região onde se esperava diminuição de qualidade. Marcação em estrela denota ponto onde está instalada a torre de transmissão.

Também foi realizada a validação do modelo de forma quantitativa, utilizando RMSE, onde o erro se trata da diferença em dB entre os valores de predição utilizando o modelo e o obtido na prática, utilizando a ferramenta de *site survey* automático. Foram comparados resultados de RMSE obtidos em 2017 para a mina de Brucutu - nesta oportunidade os valores foram obtidos via *site survey* convencional - com resultados obtidos no final de 2018; quase dois anos depois. Os resultados de RMSE obtidos em 2017 para diferentes frequências foram publicados em (ALMEIDA *et al.*, 2017). Diversos modelos de perda de propagação são comparados e o modelo Vale de Propagação, apresentado pela autora apresenta bom desempenho - a mina de Brucutu é identificada como *Mine 2* na Figura 4.6:

f [MHz]	RMSE [dB]															
	Mine 1		Mine 1		Mine 2		Mine 2		Mine 1		Mine 2		Mine 2		Mine 2	
	Macro Cell 1	Macro Cell 2	Macro Cell 2	Macro Cell 3	Macro Cell 3	Macro Cell 4	Macro Cell 4	Small Cell 1	Small Cell 1	Small Cell 2	Small Cell 2	Small Cell 3	Small Cell 3	Small Cell 4	Small Cell 4	
ITU-526	13	15.4	8.9	11.1	8.7	10.2	6.2	10.5	11.8	12.1	11.2	13.7	8.8	12.1	8.8	9.9
OH	13.8	9.4	22.6	19.2	9	9.5	19.9	13	11.6	14.8	8.6	8.7	13.7	10.6	10.4	9
COST	13.2	9.4	16.8	19.2	8.8	9.1	19.2	15.4	14	17	8.2	8.9	13.1	12.4	9.8	10
SPM	5.7	6.3	4.9	4.8	6.8	6.8	4.9	5.8	7.6	5.9	4.9	3.9	4.8	5.2	5	4.8
SPM All	6.3	7	5.6	5.3	10.3	8.6	6.7	6.5	9.2	10	6.9	7.1	5.7	5.7	6.7	5.8
AB	9.8	12.7	10.4	13.8	12	13.3	11.3	13.4	7.7	9.4	12.6	13	7.9	10	10.8	10
Vale All	8.1	8	7	6.7	8.9	7.9	7.6	7.1	8.2	9.6	9.8	9.1	6	6.1	7.2	7.3
Vale	7.1	7.7	6.4	6.2	8	7.8	6.7	6.9	7.8	9.2	9.2	7.9	5.9	5.5	6.8	7.3
Optimal k	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	7	7	7	7	7	7
Samples	13945	11837	8324	5526	3217	3237	5760	5776	3098	2034	4243	2543	3398	2250	2160	1550

Figura 4.6: Valores de RMSE para vários modelos de perda de propagação. Brucutu é identificado como *Mine 2*.

As medições realizadas em 2018 mostraram resultado semelhante, com valores de RMSE de 7.7 dB, mesmo considerando a aplicação em frequência diferente (1500 MHz) das testadas em 2017.

Avaliando graficamente todos os pontos medidos na coleta de dados de 2018 e comparando com a predição apontada pelo modelo Vale, obtemos o resultado da Figura 4.7:

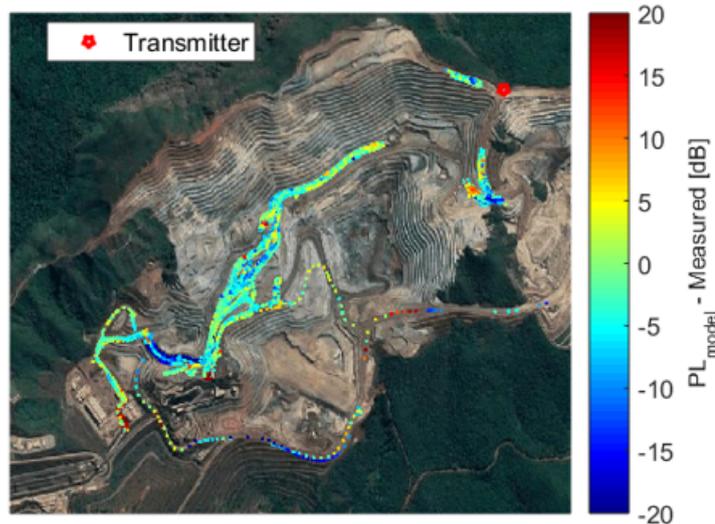


Figura 4.7: Diferença, em dB , entre valores calculados pelo “modelo Vale e os medidos em campo. Estão representadas todas as rotas de todos os equipamentos.

As medições abrangeram boa parte da área operacional trafegável da mina. Os acessos principais, bem como os pontos de carga e basculamento (as extremidades nas rotas) tiveram dados repetidamente coletados e as áreas com maior erro (apontadas em azul escuro no mapa) se concentraram na região sul e sudoeste do mapa, por motivos que abordaremos adiante.

Na coleta de dados de 2018 foram utilizados três tipos de equipamentos diferentes, com dimensões distintas, conforme Figura 4.8. Os variados portes dos veículos refletem, consequentemente, em alturas de instalação diferentes das antenas, “estressando” o modelo e ampliando o espectro de configurações possível para o receptor.

A camionete, por exemplo, possui antena instalada em pequena distância em relação ao solo, o que favorece a probabilidade de ocorrência de difração no percurso entre transmissor e receptor. Já no caminhão a maior altura de instalação leva a menor susceptibilidade de perdas desta natureza. Este comportamento - esperado - pode ser confirmado comparando os valores leitura de RSSI para cada tipo de equipamento durante o *site survey*, mostrados nas Figuras de 4.9 a 4.14.

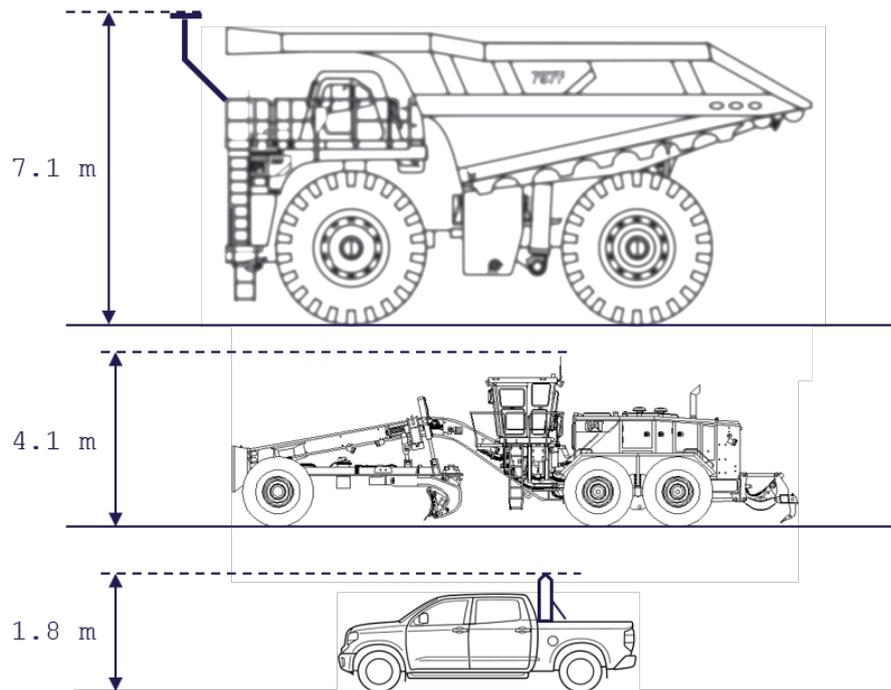


Figura 4.8: A altura de instalação de cada antena varia com o equipamento e esse parâmetro alimenta o modelo Vale.

Observa-se, dentre os percursos dos equipamentos, que a camionete possui algumas regiões com valores de recepção de rede relativamente ruins. Isso se deve à altura de instalação da antena, conforme esperado, mas também devido a outros fatores correlacionados ao teste: na Figura 4.13, observa-se que a camionete percorre trechos na região sudoeste do mapa (caracterizados em azul escuro) com relativa baixa qualidade de rede. Estes locais não fazem parte da região operacional da mina e, portanto, não são considerados no plano de atendimento de rede. Os valores de RMSE maiores para a camionete também são influenciados por esta mesma região, devido ao fato de que o mapa carregado no preditor é do tipo DTM (*Digital Terrain Model*), que não considera edificações e instalações industriais - caso da região em questão, que abriga a oficina de veículos pesados, armazéns e outras estruturas operacionais. O modelo, portanto, não considerou estas edificações na predição. Além das diferentes dimensões, os equipamentos utilizados possuem padrões de locomoção diferentes dentro da área operacional que podem afetar a qualidade de rede e diversificar as amostras de medição. A camionete atende ao objetivo de “virtualização” de acessos para os equipamentos autônomos (Capítulo 1), além do transporte de pessoas dentro da mina. Desta forma, faz trajetos de certa forma imprevisíveis, aleatórios e pouco consistentes. Atinge rapidamente a velocidade máxima permitida (40 km/h), mas pode permanecer parada por vários minutos em um local, aguardando atividades dos então ocupantes fora do veículo, bem como acessar áreas externas à área de operação. A motoniveladora apresenta comportamento mais constante quanto ao padrão de trajeto e velocidade, trafegando dentro dos limites área operacional e, via de regra, o faz mais frequentemente nas extremidades externas das pistas, na confecção de drenagens e remoção de material dos acessos.

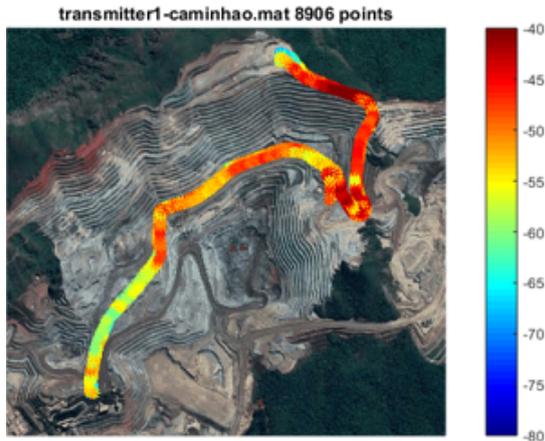


Figura 4.9: Percurso do caminhão durante a coleta de dados.

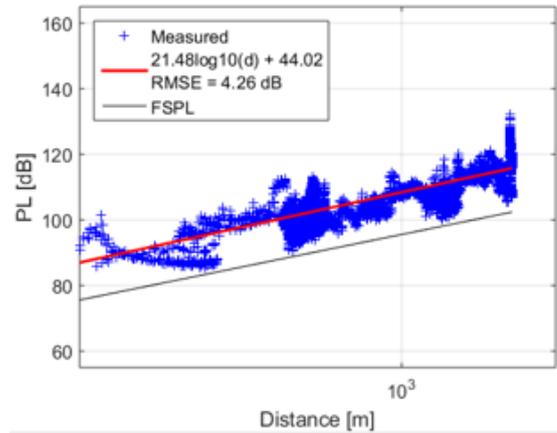


Figura 4.10: Aderência dos modelos Vale e FSPL à medição.

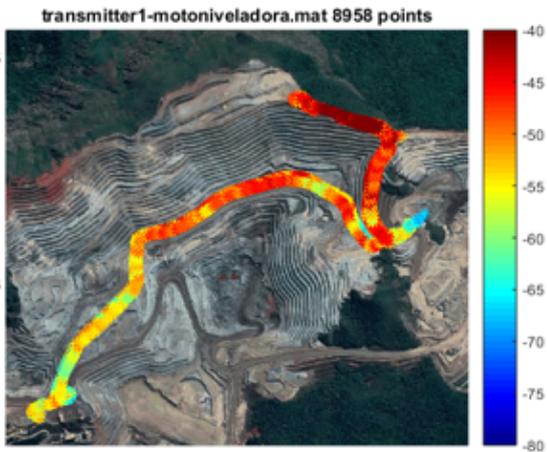


Figura 4.11: Percurso da motoniveladora durante a coleta de dados.

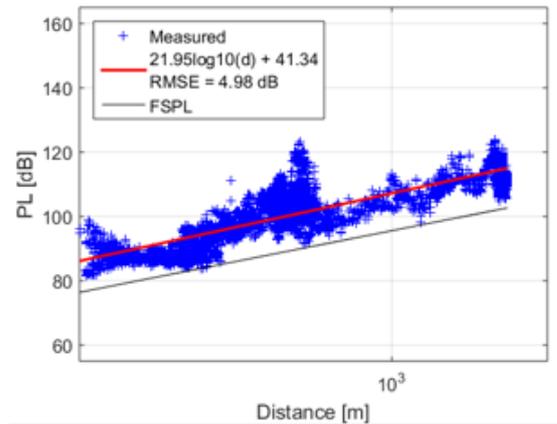


Figura 4.12: Aderência dos modelos Vale e FSPL à medição.

Por trafegar nas beiradas dos acessos, está susceptível a ter sua visada direta com o transmissor encoberta pelas bermas e leiras, que provocam “sombras” de cobertura de rede. Já o caminhão possui o comportamento mais consistente e previsível dentre as entidades amostradas: trafega ao centro dos acessos e sempre dentro da área de interesse operacional. Possui, entretanto, partes móveis (caçamba) que podem encobrir a visada direta entre transmissor e receptor, tema abordado em De Oliveira Gomes *et al.* (2018).

Desta forma podemos afirmar que, utilizando os dados provenientes destas coletas, o modelo Vale foi submetido à validação suficientemente ampla, tanto quanto à variação topográfica - intervalo de dois anos com a mina em operação - quanto à plurais características físicas de montagem e “comportamentais” dos veículos utilizados nos testes. E com bons resultados de RMSE o modelo se torna opção adequada para alimentar ferramentas de predição no contexto de minas a céu aberto.

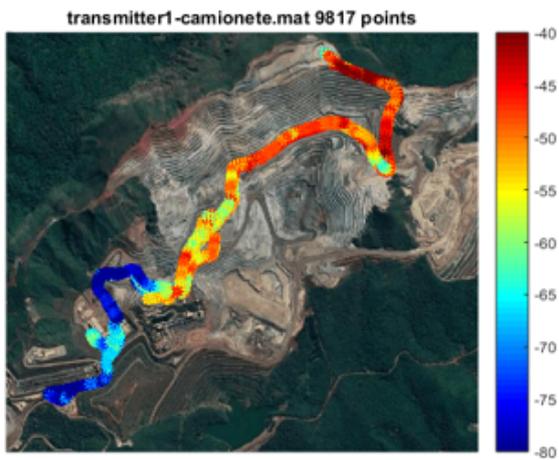


Figura 4.13: Percurso da camionete durante a coleta de dados.

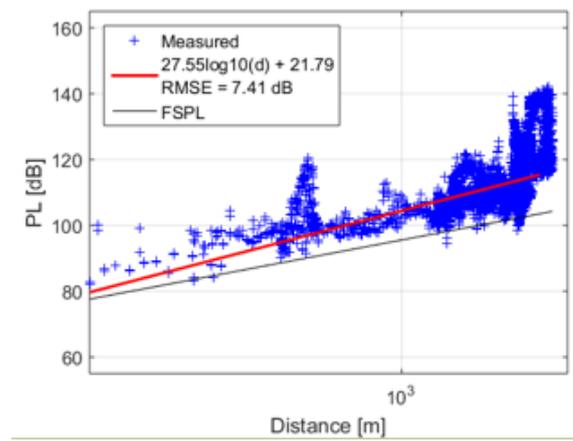


Figura 4.14: Aderência dos modelos Vale e FSPL à medição.

5. Conclusões

O primeiro objetivo enumerado no Capítulo 1 para este trabalho era desenvolver ferramenta para auxiliar a equipe de telecomunicações nas tomadas de decisão no dia-a-dia das operações das minas onde existem tecnologias altamente dependentes de redes sem fio com altos requisitos de confiabilidade. Sendo utilizada há alguns meses, a ferramenta já apresenta resultados, como foi verificado no Capítulo 4. A tarefa de substituir o *site survey* por meio de *drive test* pelas coletas realizadas remotamente vêm sendo cumprida.

O segundo objetivo trata de gerar uma base de dados de características georreferenciadas de redes sem fio das operações autônomas da Vale vem se concretizando, na forma de efeito colateral devido à crescente demanda da equipe por informações mais frequentes e detalhadas das características de rede. Está nos planos, ainda, a formação de base de dados estruturada para os resultados dos surveys; será implantado um banco de dados em SQL onde, juntamente com o desenvolvimento do software que irá encapsular as funções descritas no Capítulo 4, dentre outras informações, conterá os resultados completos dos *site surveys* gerados remotamente para alimentar outras análises posteriores pela equipe do projeto ou parceiros. Para tal, é importante documentar quais as características da rede em relação aos parâmetros dos transmissores quando aquele resultado foi gerado. Dados provenientes de vários *site surveys* “automáticos” estão sendo armazenados e já vem sendo utilizados em análises comparativas entre diferentes parâmetros e podem alimentar trabalhos futuros.

O terceiro objetivo proposto era validar o modelo de propagação Vale, foi cumprido, uma vez que foi colocado à prova e conseguiu bons resultados qualitativos e quantitativos, mesmo submetido à parâmetros diferentes de local - uma vez que a mina se alterou no meio tempo entre sua elaboração e os dias atuais - e de frequência.

5.1. Contribuições da Dissertação

Este trabalho é fruto de uma parceria entre diversos membros entusiastas da tecnologia - principalmente relacionadas à comunicação sem fio. São parte integrante do grupo de colaboradores o prof. Luis Uzeda e Erika Almeida. Desta parceria se originaram outros trabalhos que foram desenvolvidos ao longo da elaboração deste projeto. No primeiro semestre de 2018 um artigo foi submetido e aprovado para apresentação no *IEEE PIMRC 2018 Workshop*. O artigo, que utilizou o mapa da mina de Brucutu como objeto de simulação, analisa os efeitos do sombreamento causado por caminhões de grande porte e elementos do equipamento, como a caçamba em posição alta, na propagação do sinal em minas a céu aberto. As simulações de *ray tracing* foram executadas a fim de quantificar impactos na propagação, como o *Excess Path Loss*. Os resultados mostram que, assim como se já observa empiricamente, de fato há impacto do maquinário ou de parte dele na propagação. Baseando-se nesses resultados foram propostas melhorias para as instalações de rede sem fio existentes e futuras. Outra contribuição digna de nota trata de artigo com foco em análise da viabilidade financeira de se estruturar, antecipadamente, a rede sem fio para atender a uma mina a céu aberto. O artigo, denominado *Deployment strategies for the industrial IoT: a case study based on surface mines*, fez uso dos dados levantados em algumas campanhas de coleta que fizeram parte desta dissertação, além dentre outros trabalhos correlatos e teve sua submissão aprovada no *IEEE 90th Vehicular Technology Conference*. No mesmo evento foi submetido e aprovado segundo artigo, *Validation of the Vale Path Loss Model for Open-pit Mines in Different Stages of Mine Exploration* que aborda um dos principais tópicos abordados nesse trabalho: a validação do *modelo Vale*. Nele o *modelo Vale* se consolida como alternativa prática e assertiva para predições em ambientes de minas de ferro a céu aberto. Esta dissertação também criou insumos para artigo submetido e aprovado na *ABM Week 2019*. Com o título de *Implantação de Caminhões Fora de Estrada na Indústria da Mineração*, o texto aborda a gestão de mudanças necessária no âmbito operacional e organizacional das empresas que optam pela implantação deste tipo de tecnologia. Há atenção especial nos aspectos tecnológicos, que podem ser considerados disruptivos em comparação com o parque instalado na maioria das empresas de mineração, como, por exemplo, em relação aos requisitos de rede sem fio.

Este trabalho também subsidiou com informações e dados empíricos dois capítulos de documentação da Vale relacionada ao projeto e implementação de redes sem fio em ambiente de mina a céu aberto. Estas informações serão utilizadas para nortear os procedimentos de implantação de projetos autônomos na Vale global. Os capítulos em questão tratam de predição de rede e de automatização de *site surveys* utilizando a ferramenta apresentada nessa dissertação.

5.2. Trabalhos Futuros

A disponibilidade de dados de qualidade da rede abre várias frentes de aplicações possíveis. Entretanto, é razoável aumentar a quantidade dos dados disponíveis, abordando aspectos que podem ser correlacionados posteriormente; fatores relacionados ao clima, como umidade e temperatura, são exemplos de informações que podem ser incorporadas aos indicadores de qualidade no momento da coleta dos dados. Dados referentes à litologia predominante também pode ser incorporados. Para tal, o plano de lavra com a caracterização de qualidade do material nas frentes existentes pode ser associado.

São outros exemplos de frentes de estudo que podem utilizar a ferramenta proposta neste trabalho:

1. Correlacionar quantitativamente a qualidade de rede sem fio e as condições climáticas presentes no ambiente onde haverá a propagação.
2. Correlacionar quantitativamente a qualidade de rede sem fio com e a velocidade empregadas pelos equipamentos durante a operação.
3. Medir os efeitos do tempo de uso (idade) dos elementos de hardware na qualidade da rede e determinar, desta forma, um ponto otimizado de substituição destes, com foco no ganho econômico.

Referências Bibliográficas

- AGUIRRE, L. A. “Introdução à Identificação de Sistemas – Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais”. Em: *UFMG*, 2007. ISBN: 978-85-7041-584-4. doi: 10.13140/RG.2.1.1616.7925.
- AHSON, S. *WiMAX Applications*. 2007. ISBN: 9781420045482 (electronic bk.)\r9781420045475.
- ALMEIDA, E., CALDWELL, G., RODRIGUEZ, I., et al.. “An Empirical Study of Propagation Models for Wireless Communications in Open-pit Mines”. 2017.
- ALMEIDA, E. P., CALDWELL, G., RODRIGUEZ, I., et al.. “Radio propagation in open-pit mines: A first look at measurements in the 2.6 GHz Band”. Em: *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC*, 2018. ISBN: 9781538635315. doi: 10.1109/PIMRC.2017.8292345.
- BORENSTEIN, J., HERKERT, J., MILLER, K. “Self-Driving Cars: Ethical Responsibilities of Design Engineers”, *IEEE Technology and Society Magazine*, 2017. ISSN: 02780097. doi: 10.1109/MTS.2017.2696600.
- BOULTER, A., HALL, R. “Wireless network requirements for the successful implementation of automation and other innovative technologies in open-pit mining”, *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2015. ISSN: 17480949. doi: 10.1080/17480930.2015.1086549.
- BRETTEL, M., FRIEDERICHSEN, N., KELLER, M., et al.. “How Virtualization, Decentralization and Network Building Change the Manufacturing Landscape: An Industry 4.0 Perspective”, *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 2014.
- BRISCOE, N. “Understanding the OSI 7-layer model”, *PC Network Advisor*, 2000.
- BRUNDRETT, S. “Industry Analysis of Autonomous Mine Haul Truck Commercialization”, *Igarss 2014*, 2014. ISSN: 01864866. doi: 10.1007/s13398-014-0173-7.2.
- CASE, J. D., FEDOR, M., SCHOFFSTALL, M. L., et al.. “Simple Network Management Protocol (SNMP)”. 1989.

- DE OLIVEIRA GOMES, P., GUIEIRO, G., LOPES DE ALMEIDA, E., et al.. “Evaluation of Shadowing Caused by Mining Machinery in V2I Communications”. Em: *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC*, v. 2018-Septe, 2018. ISBN: 9781538660096. doi: 10.1109/PIMRC.2018.8580829.
- DENKOVSKI, D., ATANASOVSKI, V., GAVRILOVSKA, L., et al.. “Reliability of a Radio Environment Map: Case of Spatial Interpolation Techniques”, *Proceedings of the 7th International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks*, 2012. ISSN: 2166-5370. doi: 10.4108/icst.crowncom.2012.248452.
- ESCUADERO, A. *Modelagem para o cálculo da perda no percurso de propagação em áreas residenciais nas faixas de VHF e UHF*. Tese de Doutorado, INATEL, 2004. Disponível em: <<http://livros01.livrosgratis.com.br/cp028346.pdf>>.
- ETEMAD, K. “Overview of mobile WiMAX technology and evolution”. 2008. ISSN: 01636804.
- GOLAM SADEQUE, M., CHANDRA MOHONTA, S., FIROJ ALI, M. “Modeling and Characterization of Different Types of Fading Channel”, *International Journal of Science, Engineering and Technology Research*, 2015.
- GÖLBAŞI, O., DAGDELEN, K. “Equipment Replacement Analysis of Manual Trucks with Autonomous Truck Technology in Open Pit Mines”, *Proceedings of the International Symposium on the Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry*, 2017.
- GOLDSMITH, A. “Wireless Communications”, *Communications*, 2004. ISSN: 1520-8524. doi: 10.1017/CBO9780511841224.
- HYDER, Z., SIAU, K., NAH, F. F.-H. “Use of Artificial Intelligence , Machine Learning, and Autonomous Technologies in the Mining Industry”. Em: *Thirteenth Midwest Association for Information Systems Conference (MWAIS 2017)*, 2018.
- IBGE. “RESOLUÇÃO Nº 1 DE 2005”. 2005. Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/pmrg/faq.shtmftp://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/rpr_01_2015_sirgas2000.pdf>.
- ITU-R. *Propagation by diffraction*. 2013. ISBN: 1997199920.
- J. LEE, K. PROWSE. “Mining & Metals + Internet of Things: Industry opportunities and innovation”. 2014. Disponível em: <<http://www.marsdd.com/news-and-insights/mining-industry-iot-technology>>.

- KAGERMANN, H. N. A. O. S., (ENGINEERING), WAHLSTER, W. G. R. C. F. A. I., et al.. *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0*. Relatório técnico, 2013.
- LENNVALL, T., SVENSSON, S., HEKLAND, F. “A comparison of WirelessHART and ZigBee for industrial applications”. Em: *IEEE International Workshop on Factory Communication Systems - Proceedings, WFCS*, 2008. ISBN: 9781424423491. doi: 10.1109/WFCS.2008.4638746.
- LEWIN, D., WILLIAMSON, B., CAVE, M. “Regulating next-generation fixed access to telecommunications services”, *info*, 2009. ISSN: 14636697. doi: 10.1108/14636690910970946.
- LI, X., GE, M., DAI, X., et al.. “Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo”, *Journal of Geodesy*, 2015. ISSN: 14321394. doi: 10.1007/s00190-015-0802-8.
- MOORE, G. E. “Lithography and the future of Moore’s law”. Em: *Electron-Beam, X-Ray, EUV, and Ion-Beam Submicrometer Lithographies for Manufacturing V*, 2004. doi: 10.1117/12.209151.
- MORGADO, A., HUQ, K. M. S., MUMTAZ, S., et al.. “A survey of 5G technologies: regulatory, standardization and industrial perspectives”, *Digital Communications and Networks*, 2018. ISSN: 23528648. doi: 10.1016/j.dcan.2017.09.010.
- MUMTAZ, S., ALSOHAILY, A., PANG, Z., et al.. “Massive Internet of Things for Industrial Applications: Addressing Wireless IIoT Connectivity Challenges and Ecosystem Fragmentation”, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2017. ISSN: 19324529. doi: 10.1109/MIE.2016.2618724.
- NIXON, M. “A Comparison of WirelessHART™ and ISA100.11a”, *Emerson White Paper*, 2012.
- PAREIT, D., LANNOO, B., MOERMAN, I., et al.. “The history of WiMAX: A complete survey of the evolution in certification and standardization for IEEE 802.16 and WiMAX”, *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2012. ISSN: 1553877X. doi: 10.1109/SURV.2011.091511.00129.
- PENG, H., LI, D., ABBOUD, K., et al.. “Performance Analysis of IEEE 802.11p DCF for Multiplatooning Communications with Autonomous Vehicles”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017. ISSN: 00189545. doi: 10.1109/TVT.2016.2571696.
- PHILLIPS, C., TON, M., SICKER, D., et al.. “Practical radio environment mapping with geostatistics”. Em: *2012 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access*

- Networks, DYSPAN 2012*, 2012. ISBN: 9781467344487. doi: 10.1109/DYSPAN.2012.6478166.
- RAPPAPORT, T. S. *Wireless Communications : Principles and Practice*. 2002. ISBN: 0130422320.
- SARKAR, T. K., JI, Z., KIM, K., et al.. “A Survey of Various Propagation Models for Mobile Communication”, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2003. ISSN: 1045-9243. doi: 10.1109/MAP.2003.1232163.
- SAUTER, M. *From GSM to LTE: An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband*. 2011. ISBN: 9780470667118. doi: 10.1002/9780470978238.
- SHANTHI, V., DEEPAKNATH, T., MALLIKARJUN, K. “Communication Architecture for Remote Monitoring and Diagnostics in Open-Pit Mine”, *Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*, v. 978-1-4799-0864-6, 2013. doi: 10.1109/ETFA.2013.6648073.
- STUART BALLANTINE. *Radiotelephony for Amateurs*. University of California Libraries (January 1, 1922), 1922.
- TA, C. H., KRESTA, J. V., FORBES, J. F., et al.. “A stochastic optimization approach to mine truck allocation”, *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 2005. ISSN: 13895265. doi: 10.1080/13895260500128914.
- TEJADA, B. G. “Georeferenced monitoring system for open pit mesh networks”. 2016. Disponível em: <http://www.wmc2016.org.br/BOOK_PAPERS/03_SURFACE_MINING_006.pdf>.
- WANG, F., GHOSH, A., SANKARAN, C., et al.. “Mobile WiMAX systems: Performance and evolution”. 2008. ISSN: 01636804.
- XIAO, M., MUMTAZ, S., HUANG, Y., et al.. “Millimeter Wave Communications for Future Mobile Networks”. 2017. ISSN: 07338716.
- YANG, W., HUANG, Y. “Wireless Sensor Network Based Coal Mine Wireless and Integrated Security Monitoring Information System”. Em: *Sixth International Conference on Networking (ICN'07)*, 2007. ISBN: 0-7695-2805-8. doi: 10.1109/ICN.2007.108.
- YILMAZ BIRKAN, H., TUGCU, T., ALAGÖZ, F., et al.. “Radio environment map as enabler for practical cognitive radio networks”, *IEEE Communications Magazine*, 2013. ISSN: 01636804. doi: 10.1109/MCOM.2013.6685772.

- YU, C., YEN, M. H. “Area-efficient 128- to 2048/1536-point pipeline FFT processor for LTE and mobile WiMAX systems”, *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 2015. ISSN: 10638210. doi: 10.1109/TVLSI.2014.2350017.
- ZHAO, Y., LE, B., REED, J. H. “Network Support: The Radio Environment Map”. Em: *Cognitive Radio Technology*, 2009. ISBN: 9780123745354. doi: 10.1016/B978-0-12-374535-4.00011-4.
- ZHOU, K., LIU, T., ZHOU, L. “Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges”. Em: *2015 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, FSKD 2015*, 2016. ISBN: 9781467376822. doi: 10.1109/FSKD.2015.7382284.