



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA

JOSÉ ALDERY NOGUEIRA JÚNIOR

**AVALIAÇÃO DE UTILIZAÇÃO DE UMA REDE LORA PARA TRANSMISSÃO DE
DADOS APLICADA A UM SISTEMA DE MINETRACKING**

FORTALEZA

2019

JOSÉ ALDERY NOGUEIRA JÚNIOR

AVALIAÇÃO DE UTILIZAÇÃO DE UMA REDE LORA PARA TRANSMISSÃO DE
DADOS APLICADA A UM SISTEMA DE MINETRACKING

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

N712a Nogueira Júnior, José Aldery.

Avaliação de utilização de uma rede LoRa para transmissão de dados aplicada a um sistema de minetracking / José Aldery Nogueira Júnior. – 2019.
58 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2019.

Orientação: Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva.

1. Gerenciamento de Frota. 2. Minetracking. 3. LoRaWAN. 4. GPS. I. Título.

CDD 669

JOSÉ ALDERY NOGUEIRA JÚNIOR

AVALIAÇÃO DE UTILIZAÇÃO DE UMA REDE LORA PARA TRANSMISSÃO DE
DADOS APLICADA A UM SISTEMA DE MINETRACKING

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Ricardo Emílio F. Quevedo Nogueira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. MsC. Raimundo Carlos Martins Leite
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.
Aos meus pais, irmãs e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pelo exemplo, apoio, acolhida e afeto, sempre presentes em todos os momentos de minha vida. Ao Pedro e a Marina, crianças da casa, pelos sorrisos e pelas alegrias cotidianas. E em especial à Valeska, que sempre se mostrou disposta a me ajudar a vencer esse percurso.

Aos amigos Livia, Mariana, Thiago e Alanylson, que iniciaram essa jornada comigo, pelo incentivo, conversas, ideias e planos divididos durante esta trajetória. Em especial à Bruna, pelo apoio em todos os momentos da vida, uma amizade que não tem fim.

Agradeço, em especial, ao Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva pela disponibilidade em tecer considerações e apontar direcionamentos que foram essenciais para a concretização desta pesquisa.

Aos professores membros da Banca Examinadora pela presteza em contribuir com este trabalho. Ao corpo docente do Curso de Engenharia Metalúrgica pela excelência da formação acadêmica e aos colegas de turma pela partilha de aprendizados.

Por fim, agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram, de alguma forma, durante este percurso.

“Conhecimento não é aquilo que você sabe, mas o que você faz com aquilo que você sabe.” (Aldous Huxley).

RESUMO

A indústria de mineração necessita aumentar sua produtividade, controlar custos e reduzir os impactos ambientais causados por suas atividades. Este estudo trata de apresentar a viabilidade da aplicação da rede LoRa[®] e o seu protocolo LoRaWAN[®] no gerenciamento de frota de caminhões e escavadeiras na atividade de exploração mineral de uma mina a céu aberto. Foram testados os módulos que empregam a tecnologia LoRa[®] para o gerenciamento remoto, pois esta proporciona uma área de cobertura ampla e baixo consumo de energia. A ideia do trabalho é equipar a frota com módulos GPS (*Global Positioning System*) em um dispositivo LoRa para o envio de dados de localização a longas distâncias, possibilitando o controle em tempo real das movimentações dos equipamentos de transporte e exploração. Estes dados podem ser utilizados para a otimização do processo por meio de um sistema de *Minetracking*, onde se podem controlar indicadores de desempenho, como o consumo de combustível e desgaste dos veículos de acordo com a distância percorrida, já que os custos de transporte são bastante elevados. Além disso, o sistema de localização de veículos aumenta a segurança dos operadores. O protótipo criado utilizando a rede LoRa possibilitou a geração e envio de dados de localização e a análise do comportamento da transmissão de dados.

Palavras-chave: GPS. LoRaWAN. Gerenciamento de frota. Minetracking.

ABSTRACT

The mining industry needs to increase its productivity, control its costs and reduce the environmental impacts caused by its activities. This study presents the viability of applying the LoRa® network and its LoRaWAN® protocol for truck fleets and excavator management in the mineral exploration activity of an open pit mine. LoRa modules can be used for remote management because it provides a wide coverage area and low power consumption. The idea of the work is to equip the fleet with GPS (Global Positioning System) modules connected in a LoRa device to send location data over long distances, making possible real-time control of transport and exploration equipment routes. These data can be used for process optimization through a Minetracking system, making possible the control of performance indicators, such as fuel consumption and vehicle wear according to the distance traveled by the fleet, since transportation costs are quite high. In addition, the vehicle tracking system enhances operator safety. The prototype created using the Lora network enabled the generation and delivery of location data and the analysis of the data transmission behavior.

Keywords: GPS. LoRaWAN. Fleet Management. Minetracking.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma simplificado do ciclo operacional de uma mina a céu aberto	18
Figura 2 - Fluxo de ciclo de produção	20
Figura 3 - Alocação Estática	22
Figura 4 - Alocação Dinâmica	22
Figura 5 - Tempos de ciclo entre pontos de carga e descarga sem o sistema de otimização.	25
Figura 6 - Tempos de ciclo entre pontos de carga e descarga de forma otimizada. .	26
Figura 7 - Distância vs Vida útil da bateria	30
Figura 8 - Alcance Vs Taxa de transmissão	31
Figura 9 - Arquitetura LoRaWAN.....	32
Figura 10 - Disposição dos gateways durante simulação	33
Figura 11 - Escalabilidade de uma rede LoRaWan utilizando um único gateway	33
Figura 12 - Escalabilidade de uma rede LoRaWan utilizando um conjunto de gateways	34
Figura 13 - Módulo ESP32-D0WDQ6.....	37
Figura 14 - Módulo TTGO com GPS integrado	38
Figura 15 - Antena AP39000.....	38
Figura 16 - Antena omnidirecional.....	39
Figura 17 - Módulo e Antena utilizados como Sender	41
Figura 18 - Módulo e Antena utilizados como Receiver.....	41
Figura 19 - Simulação do Teste	44
Figura 20 - Teste com o protótipo em movimento (1)	46
Figura 21 - Teste com protótipo em movimento (2)	47
Figura 23 - Potência em função da distância	48
Figura 22 - Teste com o Receiver em ponto elevado	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação da situação anterior à implantação do sistema de despacho e a situação.	27
Tabela 2 - Tecnologias de camada física	29
Tabela 3 - Exemplo de expoentes e seus meios.	36
Tabela 4 - Requisitos do Sistema.....	39
Tabela 5 - Resultados do teste do módulo GPS.....	45

LISTA DE ABREVIATURAS

CSS	Chirp Spread Spectrum
GPS	Global Positioning System
IoT	Internet of Things
LCD	Tela de Cristal Liquido
LoRa	Long-Range
LoRaWAN	LoRa for Wide Area Networks
LPWAN	Low Power Wide Area Network
RSSF	Redes de Sensores Sem Fio
SF	Spreading Factor

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS.....	15
2.1	Objetivo Específico	15
3	CONTROLE DE MINAS	16
3.1	Operação de carregamento e transporte	17
3.1.1	<i>Carregamento</i>	19
3.1.2	<i>Transporte</i>	19
3.1.3	<i>Sistema de alocações de caminhões</i>	21
3.2	Sistema de Controle	23
3.3	Fatores relacionados ao consumo de combustível	27
4	REDE LORA	29
4.1	LoRaWAN.....	31
4.2	Escalabilidade de uma rede LoRa	32
4.3	Estudo de Propagação	35
5	MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
5.1	Módulos LoRa e acessórios	37
5.2	Procedimentos Metodológicos.....	39
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
6.1	Teste do módulo GPS	44
6.2	Teste do Protótipo em movimento	45
6.3	Teste da utilização do Receiver em ponto elevado.....	47
7	CONCLUSÕES	50
	REFERÊNCIAS.....	51
	APÊNDICE A – Curva Característica	53
	APÊNDICE B – Teste 1	54
	APÊNDICE C – Teste 2	55

APÊNDICE D – Teste 3	56
APÊNDICE E – Teste 4	57
APÊNDICE F – Tabela de Custos.....	58

1 INTRODUÇÃO

Com o crescente processo de globalização, a necessidade de controle dos diversos processos envolvidos em uma atividade é essencial para o gerenciamento mais eficiente. Na lavra de uma grande mina, o controle e registro das atividades realizadas, sejam para controle interno (gestão de recursos gastos, produtividade e segurança) ou externo (governos, órgãos ambientais), faz-se extremamente necessário.

Na maioria das empresas de mineração que aplicam métodos de mineração a céu aberto, as operações de carregamento e transporte são realizadas por carregadeiras e caminhões. Entre todas as operações realizadas na mineração a céu aberto, o transporte tem o maior custo específico. Nos últimos anos, esse método operacional tem sido amplamente discutido devido ao aumento significativo nos custos por conta da elevação de preço dos insumos como óleo diesel e pneus. Estudos de casos indicaram que as operações de transporte representam grande parte dos custos operacionais de mineração. A locação otimizada das frotas para atender as especificações de qualidade e quantidade e possibilitar a melhor produtividade é um dos grandes desafios das empresas de mineração.

Com um cenário cada vez mais competitivo e com o aumento do preço de combustíveis nos últimos anos, o dimensionamento de frota, o monitoramento dos equipamentos para evitar filas indesejadas e a definição de rotas de tráfego entre estoque e cavas são pontos que devem ser levantados e analisados para aumentar a produtividade do processo de extração. O controle efetivo do consumo de combustível e produtos do petróleo, como pneus, também traz reduções nas emissões de gases pelas empresas. Diminuir o gasto com combustível é uma opção para o controle de custos.

No contexto atual, as indústrias precisam desenvolver mais opções de eficiência energética. Com o intuito de minimizar os custos e aumentar a lucratividade do negócio, faz-se necessário analisar os possíveis empecilhos que impactam diretamente no processo de transporte entre a cava e o pátio de produtos.

Relativo ao meio ambiente, as empresas de mineração sempre são questionadas acerca dos impactos de suas atividades e da quantidade de poluição gerada. Com o melhor controle do uso de combustíveis é possível reduzir a quantidade de emissão de poluentes e isso representa um ganho tanto para as indústrias como para a sociedade.

2 OBJETIVOS

A partir das disposições, avaliar a importância da implantação de um sistema de Minetracking para o controle de operações de carga/descarga e transporte de materiais dentro de uma empresa de mineração e verificar a utilização de uma tecnologia LoRa nesse controle.

2.1 Objetivo Específico

- Analisar os métodos e tecnologias utilizadas em sistemas de Minetracking;
- Verificar a viabilidade da utilização de um sistema com tecnologia LoRa de baixa frequência para envio de informações de alimentação para um sistema de Minetracking de controle de mina;
- Realizar coleta de dados através de testes com o protótipo criado para identificação e análise de suas variáveis de funcionamento.

3 CONTROLE DE MINAS

Conforme Amaral e Lima (2008), o conceito de Mineração está ligado à extração e beneficiamento de minerais que se encontram em estado natural (sólido, líquido ou gasoso), incluindo desde a exploração de minas subterrâneas e de superfície, poços, pedreiras, até todos os processos complementares para o beneficiamento e preparo dos minérios para sua comercialização.

Existem duas abordagens gerais para a mineração: um método é conhecido como mineração a céu aberto, ou seja, realizada na superfície e o outro método é chamado de mineração subterrânea. Mineração a céu aberto é usada quando o minério está próximo à superfície da Terra, sendo um método mais antigo e mais produtivo do que a mineração subterrânea. Apesar do custo de infraestrutura fixa relativamente menor de uma mina a céu aberto, as minas de superfície exigem uma extração significativa de resíduos. Uma mina se torna inviável de continuar em operação quando a relação dos resíduos extraídos para o minério torna-se muito alto, quando o espaço de armazenamento de resíduos é insuficiente, quando as paredes do poço falham, ou quando as considerações superam os benefícios da extração (NEWMAN et al., 2010).

Conforme Koppe (2007 apud BORGES, 2013, p. 2), a expansão da economia dos países emergentes por conta dos preços das *commodities*¹ impulsionaram os investimentos no setor da mineração, com a utilização de novas tecnologias para a avaliação das minas lavráveis, uso da computação para planejamento da lavra, dimensionamento e alocação de frotas que tem por finalidade aumentar a produtividade dos processos na indústria da mineração. Segundo o mesmo autor, a maioria das minas a céu aberto ainda não utiliza algumas dessas tecnologias citadas, de forma que não existe um planejamento adequado dos tipos e do porte de equipamentos para cada operação (perfuração, escavação, transporte). Erros no dimensionamento dos equipamentos podem ocasionar um super ou subdimensionamento de equipamentos, impactando na vida útil dos citados,

¹ Commodities são produtos que funcionam como matéria-prima, produzidos em escala. Commodity vem do inglês e originalmente tem significado de mercadoria. Fonte: <https://www.tororadar.com.br/blog/commodities-o-que-e-significado>

aumento do desperdício, diminuição da produtividade e aumento de custos operacionais.

Os problemas que o setor de mineração enfrenta estão crescendo tanto em tamanho, quanto em complexidade. A produção é dependente da posição geológica do corpo de minério e da tecnologia para extração, que envolve o uso de equipamentos caros e custos de transporte elevados quando a extração se dá em locais mais distantes da área de depósito.

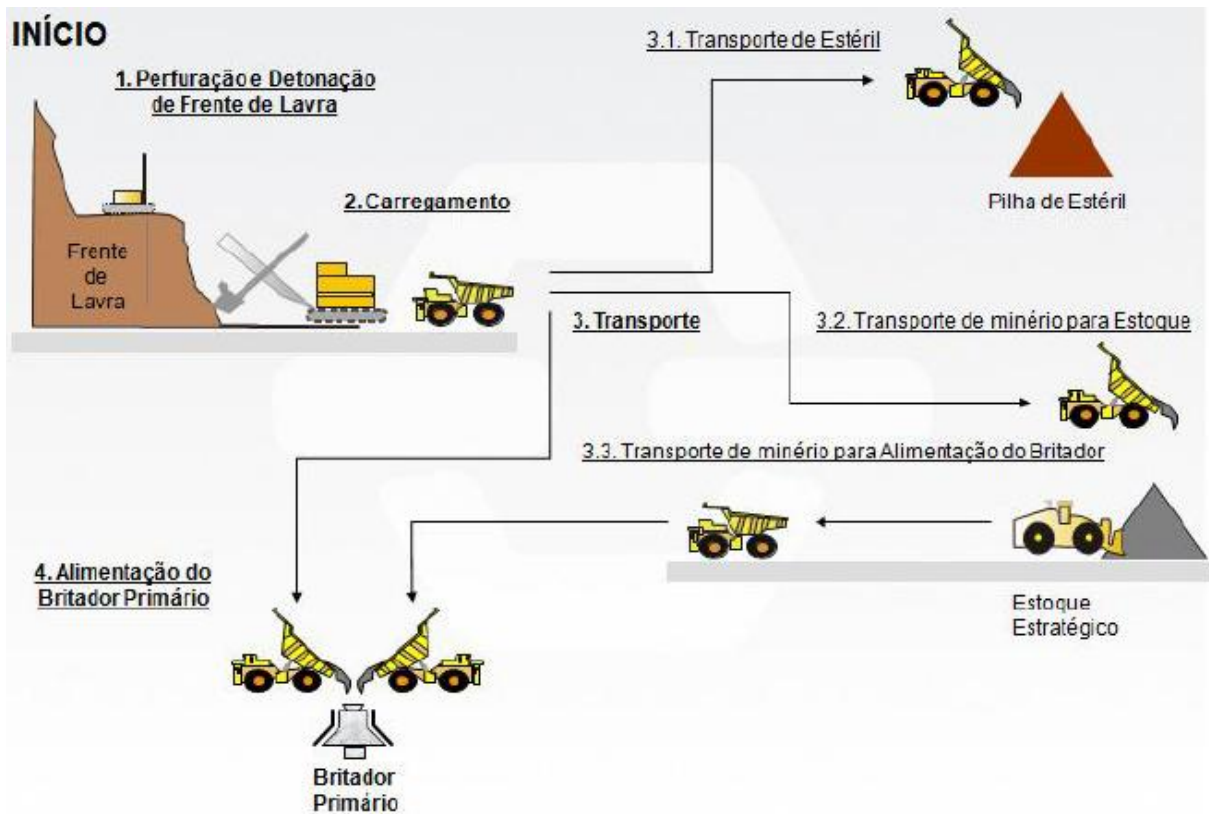
Conforme Silva (2009 apud BORGES, 2013, p. 3), a definição do tipo de equipamento a ser utilizado na operação depende de se considerar e analisar aspectos como capacidade manuseada, distância de transporte e topografia do terreno. Estes aspectos são decisivos para definir se a operação de uma mina será lucrativa ou inviável, já que os custos envolvidos, tanto de capital investido como de operação, representam uma grande parcela dos custos da operação de uma mina.

3.1 Operação de carregamento e transporte

Segundo Felsch (2014), a operação é iniciada com a preparação da área a ser lavrada para que ela possa ser perfurada e detonada. Após a detonação, há o deslocamento do equipamento de carga até a frente de lavra onde o material foi desmontado, daí se inicia o processo de carregamento.

Em minas a céu aberto, a operação de carregamento e transporte envolve etapas de deslocamento de caminhões até a frente de lavra (local onde o minério e o estéril são retirados) (Figura 1). Após a retirada, os equipamentos de carga carregam os caminhões e estes se deslocam para os pontos de descarga, que podem ser divididos em: a) pilhas de estéril (material que não é aproveitado no processo); b) pilhas de homogeneização, quando há transporte de uma quantidade maior do que o limite de beneficiamento ou quando é necessário realizar um *blend*, uma mistura entre diferentes qualidades de minério antes do beneficiamento; c) usina de tratamento, onde é realizado o beneficiamento do minério. (RODRIGUES, 2006).

Figura 1 - Fluxograma simplificado do ciclo operacional de uma mina a céu aberto



Fonte: FELSH (2014, p. 25).

Segundo Chanda e Daegelen (1995 apud FELSH, 2014), a mistura de minérios de diversas partes da mina, com diferentes qualidades, é necessária para fornecer uma qualidade uniforme para o processo, sendo bastante importante do ponto de vista operacional, mas que também ocasiona aumento de custo total da operação decorrente de movimentações constantes no carregamento e transporte.

As operações de carregamento e transporte representam cerca de 60% dos custos operacionais dos processos relacionados de uma mina, sendo assim, as atividades mais críticas e complexas dentro dos processos de lavra, de acordo com (ALVARENGA, 1997; COSTA et al., 2005; RODRIGUES, 2006, apud BORGES, 2013).

Para ÇETIN (2004 apud BORGES, 2013) este custo elevado é explicado pelo grande investimento inicial realizado durante a aquisição do maquinário para as atividades de carga e transporte e, além disso, dos custos atrelados a eles, como combustível, manutenção e treinamento de pessoal para operação do maquinário.

Um melhor dimensionamento da frota de equipamentos impacta em uma otimização de recursos financeiros e humanos, com diminuição de custos totais e unitários de carregamento e transporte.

3.1.1 Carregamento

As operações de carregamento têm o objetivo de realizar a retirada do material da lavra, após a detonação, e realizar a transferência para equipamento de transporte. Os equipamentos utilizados, geralmente, são unidades escavadeiras ou unidades carregadeiras. Segundo Pinto e Dutra (2008 apud ROCHA, 2016), os equipamentos mais utilizados para as operações de escavação e carregamento são escavadeiras a cabo, escavadeiras hidráulicas, retroescavadeiras hidráulicas, escavadeiras shovel, carregadeiras sobre pneus ou esteira, motoscrapers, dragas e monitores hidráulicos.

3.1.2 Transporte

Os equipamentos de transporte têm a função de realizar o transporte do material entre a lavra e um ponto de descarga, que varia de acordo com o que está em transporte, podendo ser material estéril, minério para estoque ou minério sendo enviado direto ao britador. Os tipos de transporte mais comuns são por caminhões ou correias.

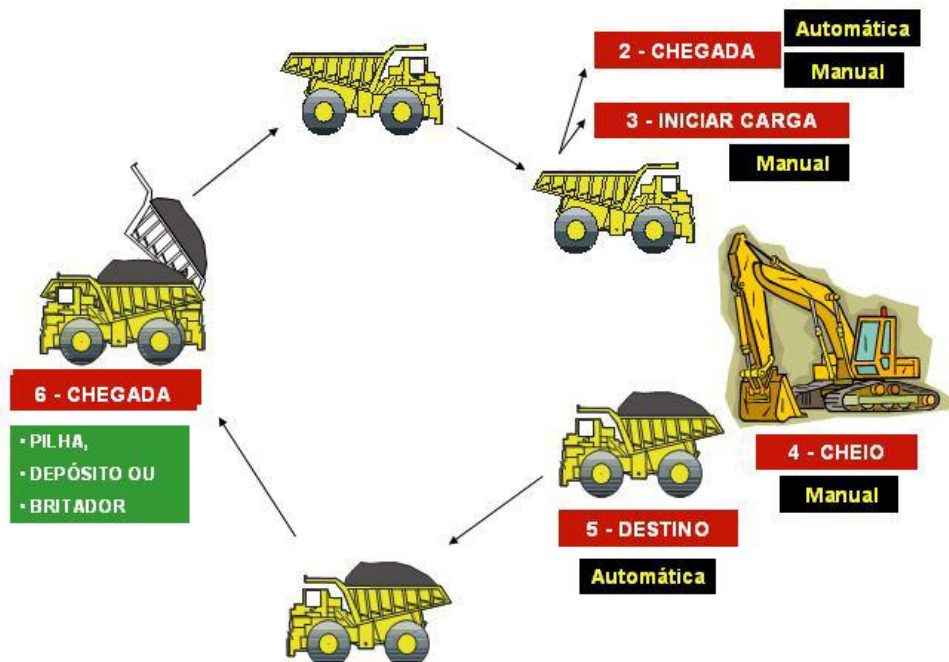
Segundo Borges (2013), os tempos e movimentos característicos de transporte por caminhões são divididos em:

- a) fixos (intrínsecos a operação): tempo de carga, tempo de descarga e tempo de manobras - soma de manobras para carregamento e manobras para descarga;
- b) variáveis: tempos de transporte, carregado e vazio.

A distância de transporte está diretamente ligada ao tempo de ciclo por viagem dos caminhões que, por consequência, reflete na produtividade da frota. Conforme Valadares et al. (2012 apud LOPES, 2014, p. 24), “a produtividade (t/h) dos equipamentos de transporte é função, basicamente, dos chamados tempos fixos, distância média de transporte (km), velocidade média (km/h) e carga média executada (t)”.

A Figura 2 mostra o passo a passo do ciclo dos caminhões, iniciando no basculamento de uma carga; na sequência o caminhão recebe a informação do local a que deve se dirigir e esse percurso é o tempo de deslocamento em vazio; quando chega ao destino é realizada a manobra de posicionamento para o equipamento de carga onde será feito o carregamento; após a conclusão do carregamento o caminhão se encaminha até o local de báscula, realizando o deslocamento cheio; chegando ao destino final, é realizada a manobra e, por fim, o basculamento do material, dando fim ao ciclo.

Figura 2 - Fluxo de ciclo de produção



Fonte: Costa (2011, p. 38).

Segundo Lopes (2010 apud BORGES, 2013, p. 46), são vantagens da lavra com transporte por caminhões:

- A possibilidade de uma alta flexibilidade operacional quando se precisa de lavra seletiva, já que é possível transferir o equipamento para outras frentes de modo a atender a demanda;
- Facilidade de contratação de mão de obra devido à predominância do uso de caminhões em minas de céu aberto;
- Não há interrupção de operação quando uma unidade de transporte é paralisada (defeito, manutenção), podendo manter um nível mínimo de operação até a normalização;
- Agilidade de evacuação dos equipamentos de áreas de risco;
- Podem-se construir pilhas reservas estrategicamente posicionadas quando há sobrecarga de operação no silo que facilitarão a operação posterior se a frota estiver sem operar normalmente.

Ainda segundo Lopes (2010 apud BORGES, 2013, p. 47), são desvantagens da lavra com transporte por caminhões:

- A eficiência energética é relativamente baixa por conta do deslocamento do peso do próprio equipamento e da carga;
- Tempo de deslocamento em vazio elevado por conta do tempo de retorno da descarga até a frente de lavra;
- Custo elevado para abertura e conservação de estradas;
- Redução de operação por conta de intempéries como chuvas e neblinas.

3.1.3 Sistema de alocações de caminhões

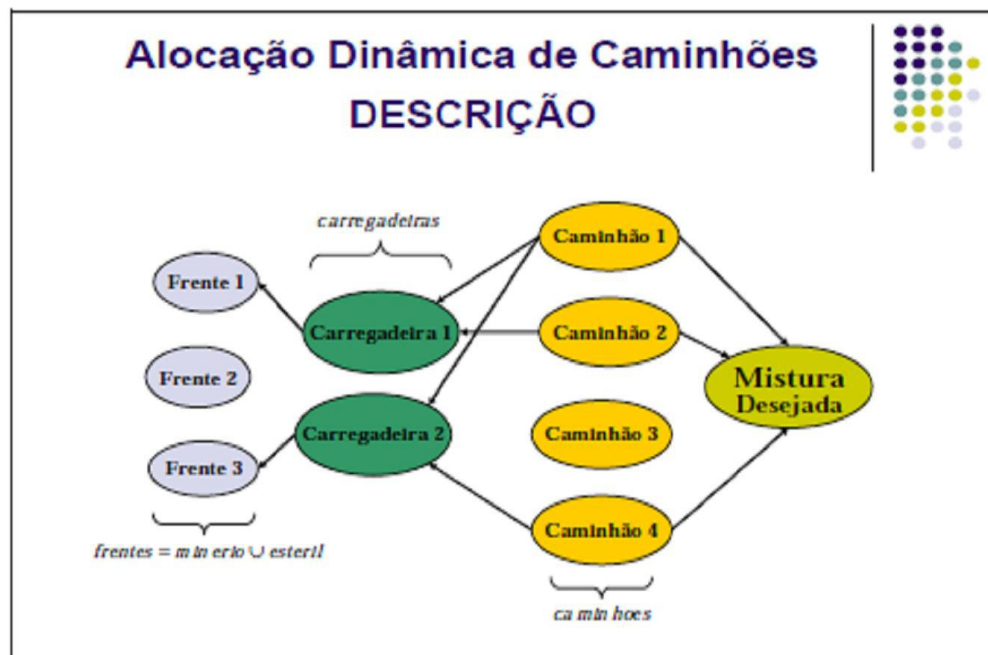
Rodrigues (2006) afirma que as minas a céu aberto utilizam dois critérios para alocação de caminhões: alocação estática e dinâmica. Na alocação estática, o deslocamento dos caminhões se dá entre dois pontos fixos, um de carga e outro de descarga, durante um determinado período de tempo (Figura 3). Na alocação dinâmica, os caminhões são direcionados para diferentes frentes de acordo com a necessidade e/ou critérios para a mistura fina. (Figura 4).

Figura 3 - Alocação Estática



Fonte: Costa (2011, p. 18).

Figura 4 - Alocação Dinâmica



Fonte: Costa (2011, p. 18).

A alocação estática geralmente é utilizada em minas de pequeno e médio porte por não exigir um sistema automático de alocação, como é necessário na alocação dinâmica. Contudo, há menor produtividade quando se utiliza a alocação estática, pois a ocorrência de filas de caminhões e ociosidade de equipamentos de carga é mais frequente. (RODRIGUES, 2006)

Segundo informações sobre a Economia Mineral Brasileira de 2015, fornecidas pelo Instituto Brasileiro de Mineração, o Brasil possui um número expressivo de recursos minerais, com uma produção de 72 substâncias minerais. Com um total de 8.400 minas, onde 2,7% são de minas de grande porte, 14,8% são de minas de médio porte, 33,5% de minas de pequeno porte e 49% de minas de micro porte. (INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO, 2015)

Kolonja et al. (1993 apud COSTA, 2011, p. 19) destaca os benefícios obtidos com a utilização de um sistema de gerenciamento de frota em uma mina, pois há ganhos operacionais através da melhora de performance nos tempos de operação e, também, nos tempos de espera, além de maior controle e melhor monitoramento, como também de um roteamento ótimo. Entretanto, a eficiência no emprego da frota depende de variáveis que envolvem os tipos de caminhões e equipamentos de carga, a estratégia de produção usada, entre outros.

Apesar dos benefícios, o custo de instalação de um sistema de controle depende do tamanho da mina e do tipo de operação, o que muitas vezes inibe a utilização em mineradoras de pequeno e médio porte.

3.2 Sistema de Controle

Costa (2011, p. 25) identifica as principais características que um sistema de controle de operação, ou *software dispatch*, necessita para seu funcionamento de modo a atingir o seu objetivo, ao considerar que “Além da busca pela otimização dinâmica das operações, ele também é responsável pela coleta e armazenamento de todas as informações necessárias para controles de produção, indicadores de desempenho, entre outros.” O referido autor ainda descreve as características do sistema, onde cada equipamento consta de um sistema GPS (*Global Positioning*

System) que permite a determinação do posicionamento do equipamento na mina e o envio é feito por sinal de rádio UHF. Há a presença de repetidores de sinal em locais estratégicos para garantir uma cobertura total que podem ter sua posição ajustada de modo a cobrir os deslocamentos realizados pelos equipamentos entre as frentes de lavra das minas. A interação entre o sistema e o operador permite a troca de instruções sobre a operação, além de informações sobre o estado do equipamento.

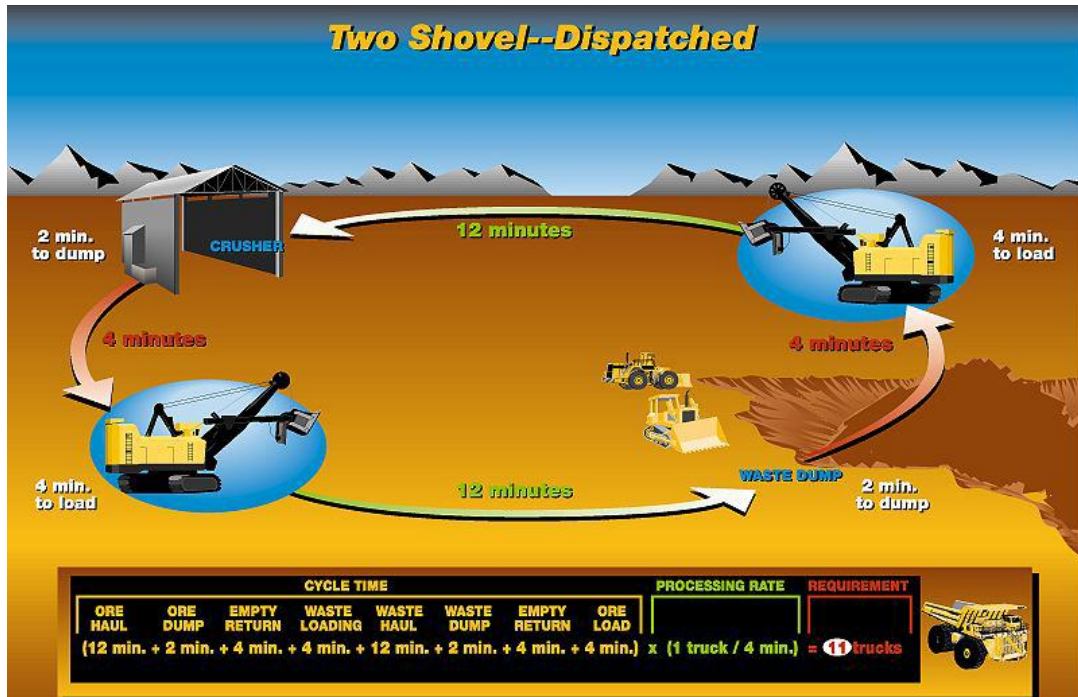
Costa (2011, p. 28) cita as principais características que um sistema deve ter, como:

- Um sistema de despacho otimizado de frota de transporte e carregamento para maximizar produtividade e minimizar ociosidade na produção;
- Interface sobre os dados vitais dos equipamentos e inspeção inicial antes dos turnos para registro de itens observados;
- Módulo para geração de relatórios a partir dos dados do sistema de controle;
- Módulo de gerenciamento de eventos de abastecimento de combustível;
- Módulo de reconciliação da movimentação de material entre depósito de estéril, minérios, unidades de britagem e remanejamentos;
- Módulo de tarefas que permite monitoramento de progresso de todas as atividades em execução e mudanças de estratégia de operação durante os turnos.

Costa (2011) reitera que há restrições operacionais para se obter uma alocação ótima de recursos de transporte e recursos de carga, ou seja, a relação entre as operações dos caminhões e escavadeiras. Capacidade dos britadores, parâmetros de qualidade, capacidade de escavação e prioridade de materiais são limitações que devem ser observadas de modo a alcançar uma alocação ótima de recursos.

Costa (2011) exemplifica como a inserção de um sistema de controle pode otimizar o processo de transporte de carga em uma mina. Na Figura 5, sem a

Figura 6 - Tempos de ciclo entre pontos de carga e descarga de forma otimizada.



Fonte: Costa (2011, p. 46).

Costa (2011) indicou a existência de certa resistência inicial por parte dos supervisores na adoção da ferramenta de controle, ocorrendo interferências que geraram conflitos com o sistema e impactando negativamente na otimização. Após a familiarização e envolvimento da equipe, os resultados obtidos nos dois primeiros anos de aplicação do sistema puderam ser observados. Utilizando o banco de dados do sistema, com um controle de difícil estratificação em controles paralelos, foi possível identificar ponto de melhoria nas operações, com destaque para os ganhos nos tempos de movimentação, havendo melhoria nos tempos fixos do processo, com velocidade 2,57% menor que a prevista para o primeiro ano de implantação. O grande ganho observado foi o de distância média de transporte, obtendo-se um ganho de 5t/h.

No segundo ano de implantação, contudo, houve uma reestruturação da frota, o que pode explicar as perdas consideráveis observadas nos tempos fixos (perda de carga, manobra, descarga e basculamento) já que os operadores não dominavam as vias e rotas. Houve aumento da distância média percorrida, impactando em 1,84 t/h de perda. O grande ganho foi por conta da velocidade média de transporte, contribuindo com 6t/h em ganho de produtividade.

Conforme Costa (2011), as melhorias obtidas no processo com a inserção de um sistema de controle podem ser sintetizadas na Tabela 1 abaixo:

Tabela 1 - Comparação da situação anterior à implantação do sistema de despacho e a situação.

Itens de Controle	Situação Anterior	Situação Atual
Índices de Fila: Escavadeira e Britadores	Não tinha	Tem
Relação km cheio /km vazio (retornos)	Não tinha Rodava em escala fixa	Otimizado
Tempos Médios (Manobra, carregamento, básculo)	Não tinha	Tem
Velocidade Média (Cheio e vazio)	Não tinha	Tem
Apropriação (Parte Diária)	Manual	Eletrônica-Online
Disponibilidade de Relatórios Gerenciais	1 a 2 semanas	Online
Forma de comunicação entre as Interfaces	Lenta	Online
Consistência das informações	Não era precisa	100%

Fonte: Costa (2011, p. 55).

3.3 Fatores relacionados ao consumo de combustível

Segundo Rodovalho (2017), entre 2008 e 2009 foi realizada uma pesquisa em 40 minas pelo governo australiano, sendo demonstrado que 17% da energia consumida vem da queima de combustíveis fósseis. Após a implementação de programa de redução, foi obtida uma diminuição de 6% no consumo de combustível.

O mesmo autor afirma que é necessário avaliar a influência dos fatores humanos, não só os parâmetros mecânicos, sobre os custos operacionais de transporte. O estilo de direção de cada operador é diferido por condições de aceleração, frenagem, curva e variações de velocidade. Além disso, variações no tempo e na topografia também alteram a performance de produção. Rodovalho (2017) realizou um estudo analisando dados de um ano coletados por um sistema de monitoramento desenvolvido para monitorar a desempenho dos equipamentos e condições de operação que influenciavam no consumo de diesel.

Foram realizados testes por meio dos dados coletados pelo sistema de controle em que se pôde comparar a eficiência de caminhões mecânicos e de caminhões eletromecânicos. Caminhões eletromecânicos possuem um sistema que transforma parte da energia mecânica em energia elétrica que, por sua vez, será convertida novamente em energia mecânica para auxiliar no uso de combustível quando o equipamento está sob tração. Os equipamentos mecânicos geram tração apenas pela queima de combustível.

Rodovalho (2017) realizou testes com os dois tipos de equipamentos em duas rotas distintas, uma rota AB em que se tem uma estrada favorável entre os pontos de carga e descarga, e a rota CD, em que a estrada é desfavorável entre os pontos de carga e descarga. Os resultados indicaram que os equipamentos mecânicos tiveram 5.8% menos consumo de combustível quando utilizados na rota AB, onde se tem uma rampa favorável. Por outro lado, os caminhões eletromecânicos obtiveram 7.4% menor consumo de combustível na rota CD, onde o percurso não é favorável. Isso mostra que a energia elétrica gerada pelos caminhões eletromecânicos ajuda em rotas não favoráveis durante a tração, o que diminui o consumo de combustível. Os caminhões mecânicos não possuem essa opção, mas foram mais eficientes em percursos favoráveis. Os resultados encontrados pelo autor são relevantes e foram implementados como um sistema de controle de carga e descarga, em que os equipamentos mecânicos são priorizados para rotas favoráveis e os eletromecânicos para rotas não favoráveis.

Após dois meses de testes, obteve-se uma redução de consumo de combustíveis de 10% para os equipamentos mecânicos e 4% para os equipamentos eletromecânicos.

4 REDE LORA

LoRa (*Long-Range*) é uma tecnologia proprietária de radiofrequência que permite a comunicação a longas distâncias com baixo consumo de energia. Essa tecnologia foi inventada em 2010 pela *startup* francesa Cycleo e adquirida pela empresa de microprocessadores SemTech em 2012. Essa tecnologia tornou-se bastante atraente para desenvolvimento de aplicações no âmbito da Internet *das Coisas* (*Internet of Things* - IoT), pois permite uma maior cobertura do que as redes tradicionalmente usadas, como Zigbee, Bluetooth e menor consumo de bateria do que as redes baseadas em sistemas celulares. (SARAIVA, 2017)

Conforme a Tabela 2 abaixo, pode-se comparar algumas tecnologias e seus resultados de alcance e vida útil de bateria:

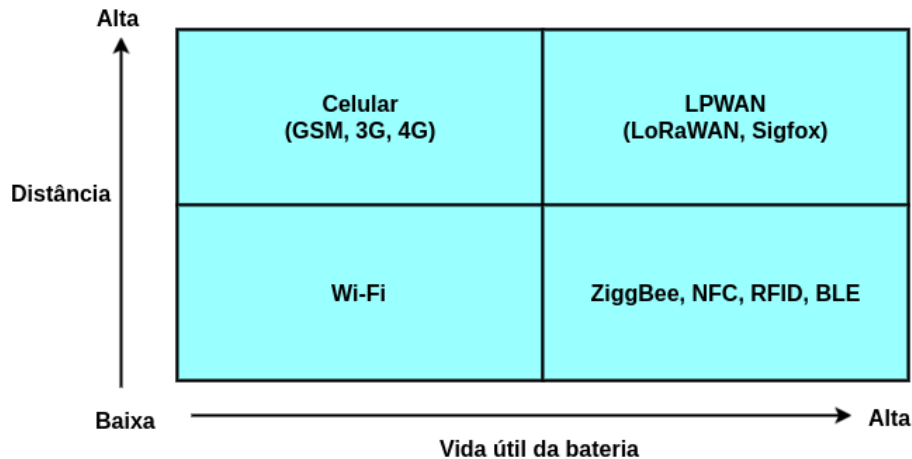
Tabela 2 - Tecnologias de camada física

Tecnologias	Alcance	Vida útil da bateria	Frequência	Sensibilidade	Taxa de Transmissão	Topologia	Soluções e Camadas Superiores
IEEE 802.15.4	70m	Anos	868.3 MHz; 915 MHz e 2.45 GHz	-90 dBm	250 Kbps	Malha	ZigBee, 6LoWPAN, Z-Wave
IEEE 802.15.1	70 m	Dias/Semanas	2.4 GHz	-90 dBm	1 Mbps	Ponto a Ponto/ Malha	BLE/CSRMesh
ISO 13157	10 cm	Meses/Anos	13.56 MHz	-90 dBm	424 Kbps	Ponto a Ponto	NFC
IEEE 802.11	30 m	Horas	2.4 e 5 GHz	-70 dBm	54 Mbps	Ponto Multi-Ponto	TCP/IP
Celular (GSM)	35 km	Dias	900 até 1900 MHz	-114 dBm	14.4 Kbps	Estrela	TCP/IP
LoRa	15km	Anos	169; 433; 915 e 868 MHz	-156 dBm	10 kbps	Estrela	LoRaWAN

Fonte: Saraiva (2017, p. 19).

Tecnologias com longa vida de bateria e com longo alcance de transmissão são as que apresentam melhores oportunidades de desenvolvimento de aplicações para IoT. Conforme a Figura 7, percebe-se que as redes de baixa potência e longo alcance ou Low Power Wide Area Network (LPWAN) são uma solução promissora, o que inclui a rede LoRa.

Figura 7 - Distância vs Vida útil da bateria



Fonte: Saraiva (2017, p.19).

As ondas de radiofrequência em que se encontram a rede LoRa estão entre as faixas de 10^2 e 10^6 Hz, comumente tratadas por ciclos por segundo. Essa tecnologia utiliza técnicas de modulação para correção de erros, chamada *Chirp Spread Spectrum* (CSS), tornando mais robusto a interferência e ao ruído, fazendo com que o receptor receba a mensagem com uma relação sinal ruído baixa. (SARAIVA, 2017).

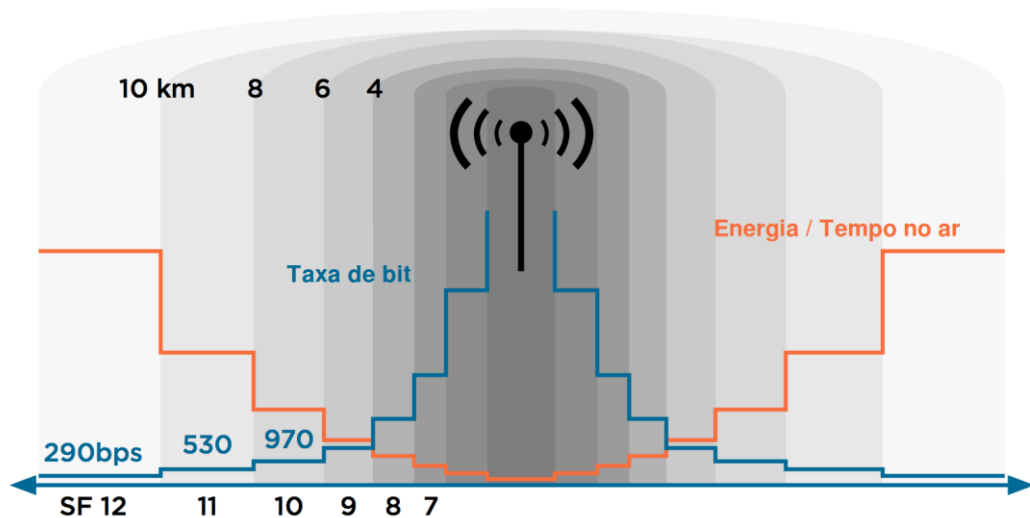
Chirp é um sinal caracterizado por alterar sua frequência ao longo do tempo, permitindo a modulação do sinal a ser transmitido. Conforme Haykin e Moher (2008 apud MEDEIROS, 2018, p. 22), “o *Spread Spectrum* é uma técnica de modulação em que um sinal com determinada largura de banda R_b é espalhado a uma largura de banda R_c muito maior que a original (R_b)”.

A modulação do LoRa utiliza parâmetros como *spreading factor* (SF), que auxilia na identificação e correção de erros da mensagem durante uma transmissão. A combinação do SF com a largura de banda do sinal e a potência de transmissão determina o alcance da cobertura da comunicação. (MEDEIROS, 2018).

A modulação LoRa permite uma sensibilidade do receptor de até -150dBm o que torna possível a comunicação em distâncias de até 5 quilômetros em ambientes urbanos e até 10 quilômetros em ambientes rurais, permitindo uma taxa de dados variável de acordo com critérios de alcance, robustez e consumo de

energia, mantendo uma largura de banda constante como pode ser visto na Figura 8. (CENTENARO et al., 2015 apud SARAIVA, 2017).

Figura 8 - Alcance Vs Taxa de transmissão.



Fonte: (DEKKERS, 2016 apud SARAIVA, 2017, p. 21).

4.1 LoRaWAN

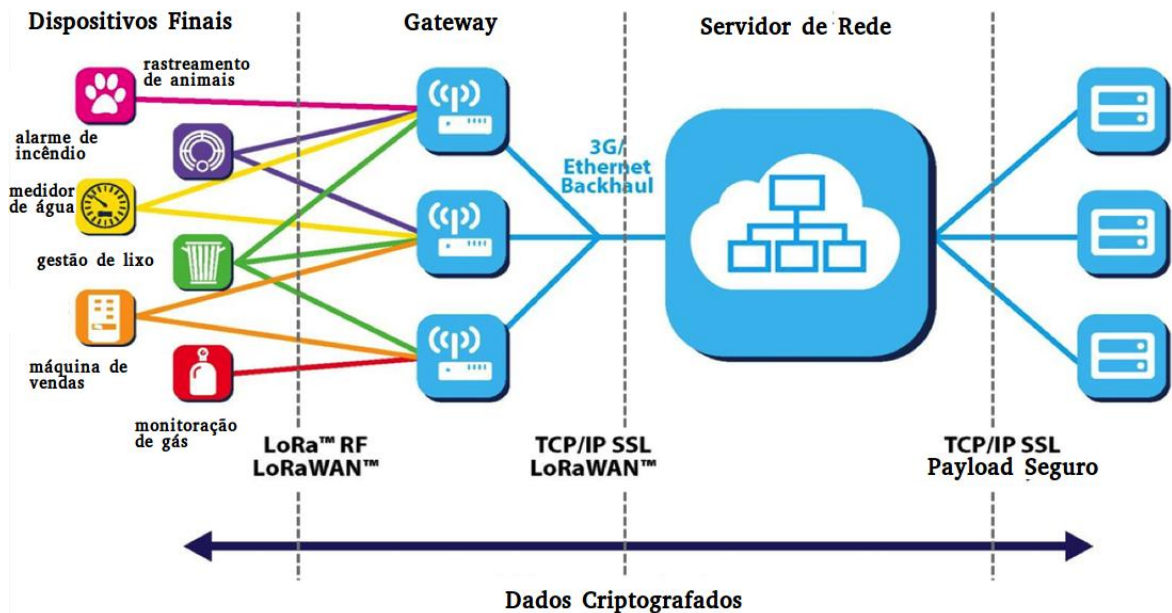
LoRaWAN é uma rede com modulação própria de sinal e protocolo aberto patrocinado pela LoRa Alliance com o objetivo de implementar o funcionamento da rede LoRa. A rede LoRa necessita de protocolos de comunicação com regras de como os dados serão tratados para se obter uma rede de qualidade. Unindo-se a modulação LoRa e as especificações técnicas do LoRaWAN, obteve-se alcance de 2 a 5 km em áreas urbanas e 15km em áreas descampadas e, por conta da baixa potência, uma duração de bateria de até 10 anos. (TEIXEIRA; ALMEIDA, 2017).

O sistema LoRaWAN consiste em três componentes principais, como mostrado na Figura 9 (VANGELISTA; ZANELLA; ZORZI, 2015 apud SARAIVA, 2017, p. 24):

- Dispositivos finais: sensores conectados através da interface de rádio LoRa a um ou mais gateways LoRa;

- Gateways: Concentradores que fazem a ligação entre dispositivos finais e o Servidor de Rede;
- Servidor de Rede: o servidor que controla todas as etapas da rede, como segurança, integração, gestão de recursos.

Figura 9 - Arquitetura LoRaWAN.

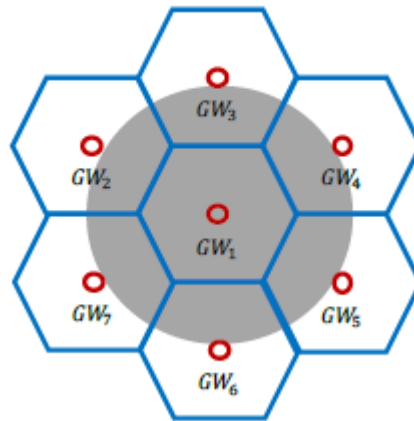


Fonte: NNNCO (2015 apud SARAIVA, 2017, p. 24).

4.2 Escalabilidade de uma rede LoRa

Reynders et al. (2018) utilizou uma ferramenta NS-3 para simular o funcionamento de uma rede LoRa com diferentes quantidades de módulos e de gateways e como esse aumento impactaria na taxa de entrega dos dados no gateway. A disposição dos gateways na simulação pode ser observada na Figura 10.

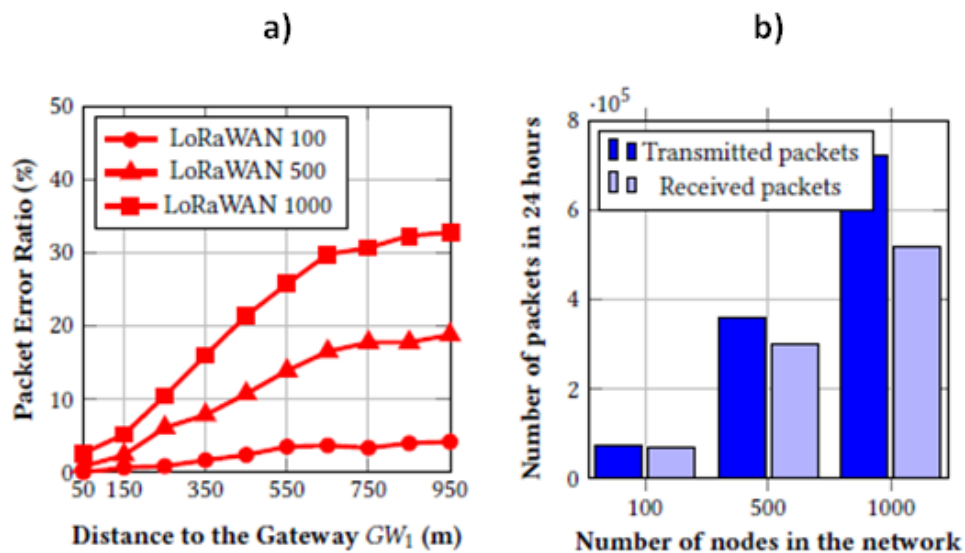
Figura 10 - Disposição dos gateways durante simulação.



Fonte: Reynders et al. (2018, p. 66).

Os resultados da simulação do primeiro cenário, com o uso apenas do gateway 1 (GW_1) mostram que quanto mais próximo do gateway os módulos estiverem, maior é a taxa de recepção dos pacotes de dados. Contudo, com o aumento do número de dispositivos há o aumento da taxa de perda de pacotes de dados recebidos, como pode ser visto na Figura 11.

Figura 11 - Escalabilidade de uma rede LoRaWAN utilizando um único gateway.

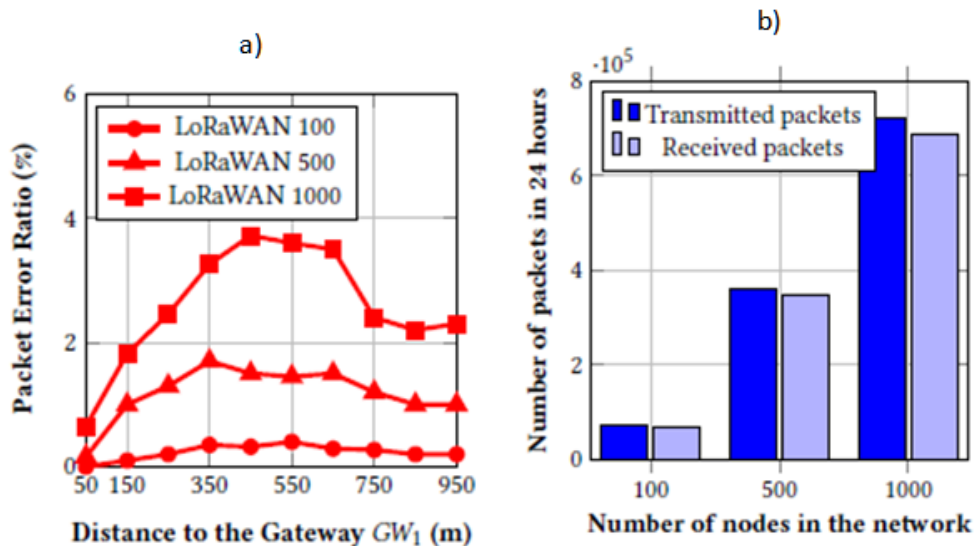


Fonte: Adaptado Reynders et al. (2018, p. 67).

No gráfico a) da Figura 11 vemos que com o aumento do número de dispositivos, maior a taxa de perda de dados com o aumento da distância entre o módulo e o gateway. No gráfico b), a diferença entre as duas barras é a quantidade de pacotes de dados perdidos. Vemos que para um número de 100 dispositivos o número de pacotes transmitidos em 24h manteve-se constante, sem grandes perdas, já para uma quantidade de 1000 dispositivos houve uma queda no número de pacotes recebidos.

Para o segundo cenário da simulação, foram utilizados os 7 gateways dispostos como mostrado na Figura 10. Os resultados para o segundo cenário podem ser observados na Figura 12, que mostraram que o aumento de gateways ocasionou uma diminuição da taxa de perda de dados a partir de 500m já que os pacotes que antes eram perdidos pelo GW_1 agora são recebidos pelos gateways das extremidades, ou seja, o aumento de gateways aumenta significativamente a confiabilidade na recepção de dados.

Figura 12 - Escalabilidade de uma rede LoRaWan utilizando um conjunto de gateways.



Fonte: Adaptado Reynders et al. (2018, p. 67).

4.3 Estudo de Propagação

De acordo com Haaykin e Moher (2008 apud MEDEIROS, 2018) o estudo do comportamento de comunicações sem fio fornece uma estimativa de potência requerida na transmissão e compensação de perdas durante a transmissão, de modo a se obter uma comunicação mais confiável. As propagações de um sinal são divididas em:

Conforme Medeiros (2018, p. 33):

As propagações de um sinal são divididas em três tipos: Propagação no espaço livre, que está associado a uma propagação livre, sem obstáculos entre transmissor e receptor, Reflexão que se dá pelo rebatimento das ondas eletromagnéticas por objetos, como veículos ou construções e Difração cujas ondas contornam os objetos ou passam através de objetos com aberturas.

O sinal recebido é, portando, uma combinação desses tipos de propagação, percorrendo diversos trajetos até o receptor e fatores como topografia do terreno, construções, curvatura da terra, entre outros resultam em um estudo complexo pois há aumento da reflexão e difração. Como alternativa, pode-se fazer uso de modelos estatísticos que fazem uma aproximação empírica de ambientes genéricos, como urbano, suburbano e rural. Uma dessas abordagens proposta por Haykin e Moher (2008 apud MEDEIROS, 2018, p. 35) é a *perda de percurso médio*, que após anos de estudo das medidas de campo elétrico em diversos meios em função da distância entre receptor e transmissor, chegou até a equação 4.1:

$$\frac{Pr}{Pt} = \frac{\beta}{r^n} \quad (4.1)$$

Onde P_t e P_r são, respectivamente, as potências de transmissão e recepção, n é o expoente de percurso médio e depende do meio de propagação (que pode ser visto na Tabela 3). β representa as perdas relacionadas à frequência, altura da antena, dentre outros.

Tabela 3- Exemplo de expoentes e seus meios.

Meio	n
Espaço livre	2
Rural (plano)	3
Rural (montanhoso)	3,5
Suburbano (plano)	4
Urbano denso	4,5

Fonte: Haykin; Moher (2008 apud MEDEIROS, 2018, p. 35).

A equação 4.1 em sua forma logarítmica é:

$$Lp = \beta_0 (dB) - 10 \log\left(\frac{r}{r_0}\right) \quad (4.2)$$

Onde β_0 é a perda de percurso medida em relação a uma distância de referência, geralmente 1 metro. Com essa equação é possível ter uma estimativa do comportamento do sinal ao longo da distância de acordo com o meio a ser analisado.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e procedimentos utilizados para realização deste trabalho estão listados a seguir.

5.1 Módulos LoRa e acessórios

No mercado, existem dispositivos com tecnologia LoRa que usam do chip da Semtech da série Sx127X que embarcam a camada física do LoRa. Dentre os dispositivos, está o transceptor da empresa Heltec Automation, o ESP32-D0WDQ6, o qual foi utilizado neste trabalho.

Figura 13 - Módulo ESP32-D0WDQ6.



Fonte: Manual Fabricante.

O dispositivo usa o módulo Sx1276, opera a uma frequência entre 868-915 MHz com comunicação serial de 2,7 à 3,6 V, e uma memória de 520 KB.

O outro módulo utilizado foi o TTGO T-beam ESP32, com tensão de funcionamento entre 1.8 ~ 3.7 v, frequência de operação entre 868-915 MHz. A localização é feita por meio de um modulo GPS on-board u-blox NEO-6M GPS com antena feita de cerâmica, memória interna de 520kB.

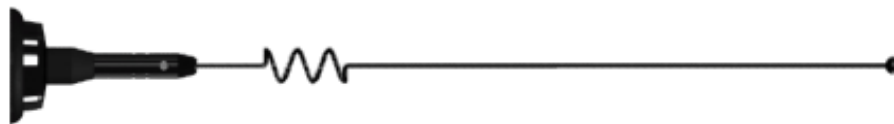
Figura 14 - Módulo TTGO com GPS integrado.



Fonte: Manual Fabricante.

Também foi utilizada uma antena móvel, a AP3900 UHF 5/8 de Onda WHIP, que atende a frequência de 900 MHz, é construída de aço inoxidável de alta qualidade, Zamac, borracha de alta eficiência na vedação, resistente a intempéries e produtos químicos. Seu acabamento é feito em pintura epóxi. Projetada para operar nas faixas de UHF, deve ser instalada no teto do veículo ou em local com semelhança física (Figura 15). Foi utilizada uma antena wireless da marca OEM omnidirecional com 6 dBi de ganho (Figura 16).

Figura 15 - Antena AP39000.



Fonte: Manual do Fabricante.

Figura 16 - Antena omnidirecional.



Fonte: Manual do Fabricante.

Os dados com os custos dos módulos utilizados no protótipo estão listados no Apêndice F.

5.2 Procedimentos Metodológicos

Antes de projetar um sistema de registro, é necessário levantar os requisitos básicos do que o sistema deve conter e as atividades ou processos que deve realizar. Dessa forma, definimos os requisitos, demonstrados na Tabela 4, como os responsáveis pelo delineamento da pesquisa. Uma das características de um sistema de registro é proporcionar o controle da localização dos equipamentos, além de dados de distância percorrida, utilizando a comunicação a longas distâncias, com baixo consumo de energia.

Tabela 4 - Requisitos do Sistema.

Item	Descrição
Nome	Plataforma LoraWAN
Propósito	Disponibilizar uma plataforma para desenvolvimento de uma aplicação de Minetracking com tecnologia LoraWAN
Entradas	Dados de GPS dos equipamentos; Interface para inserção de dados dos usuários;
Saídas	Envio dos dados de localização e percurso;
Desempenho	Comunicação a distâncias superiores a 500m.

Fonte: Elaborada pelo autor.

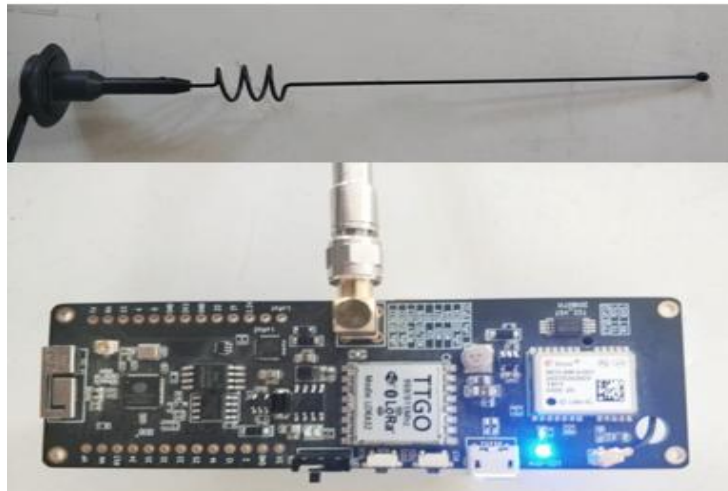
O protótipo tem como objetivo atender áreas que não possuem rede 3G/4G, o que impossibilita a utilização de outras ferramentas que usam esse tipo de conexão para a transmissão de dados. Como também não há cobertura total de Wifi e a expansão da mesma para toda a área a ser coberta demandaria um custo elevado, foi identificada a possibilidade de utilizar-se a tecnologia LoRa.

Com o objetivo de atender os requisitos de comunicação e de desempenho, utilizamos um módulo de comunicação LoRa que foi acoplado a uma antena compacta e fixada no equipamento de transporte. Destacamos que o dispositivo LoRa tem a função de enviar a localização (latitude e longitude) do equipamento de transporte em operação a um *Gateway* central, possibilitando a identificação do local em que o veículo está, além de dados de distância e percurso realizado pelo equipamento.

Neste projeto, utilizamos testes como instrumento de coleta de dados, através dos quais buscou-se analisar a viabilidade da transmissão de dados do módulo LoRa, avaliando alcance de transmissão, perda de pacotes e potência do sinal recebido. O teste tem como característica a análise da integridade do sinal enviado de acordo com o distanciamento dos módulos LoRa e é realizado por meio de dois dispositivos: o primeiro, chamado *Sender*, que enviará o sinal; o segundo, chamado *Receiver*, que receberá o sinal. A informação é enviada pelo transmissor continuamente ao receptor. Entretanto, haverá uma distância entre os módulos em que os dados não chegarão de forma contínua, ocorrendo um comprometimento da integridade do canal de comunicação.

O módulo utilizado como *Sender* foi o TTGO T-Beam ESP32 que possui um módulo GPS acoplado, responsável pelo envio de latitude e longitude, dados transmitidos via LoRa que servirão para localizar os equipamentos em campo. O módulo foi acoplado à antena AP3900 (Figura 17).

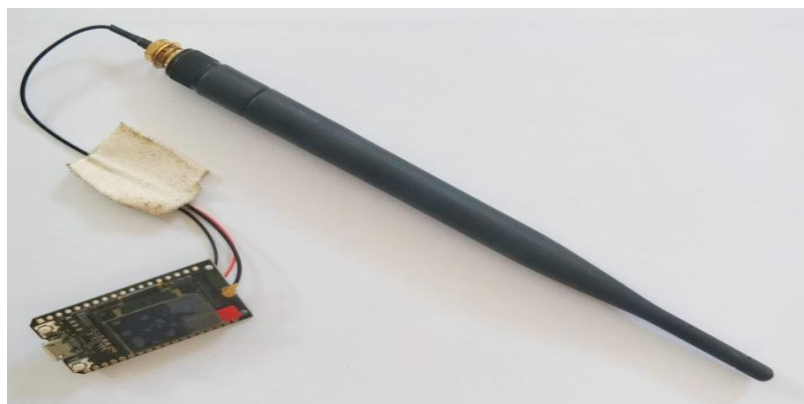
Figura 17 - Módulo e Antena utilizados como *Sender*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O módulo utilizado como *Receiver* é o ESP32-D0WDQ6 que foi conectado à antena da OEM de 6dBi. Este módulo teve a função de aguardar a chegada de dados enviados pelo módulo *Sender*. Dados que foram impressos na tela do dispositivo e transmitidos até o banco de dados que futuramente alimentará a interface do sistema Minetracking (Figura 18).

Figura 18 - Módulo e Antena utilizados como *Receiver*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A distância entre dois pontos de latitude e longitude pôde ser determinada por meio da Equação de Haversine (INGOLE, P .V; NICHAT, M. K. apud MEDEIROS, 2018, p 57), vista a seguir em sua forma final:

$$H = \sin^{-1} \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{LTO - LTD}{2} \right) + \cos(LTO) \cos(LTD) \sin^2 \left(\frac{LGO - LGD}{2} \right)} \right) \quad (5.1)$$

$$D = 2rH$$

Onde LTO (Latitude de origem), LTD (Latitude de Destino), LGO(Longitude de Origem), LTD (Longitude de Destino), todas em radiano. r é o raio da terra em quilômetros e D a distância entre pontos.

A fórmula de Haversine trata a terra como uma esfera perfeita, porém, como a terra não é uma esfera perfeita, é necessário utilizar o valor médio de seu raio, 6371 quilômetros. A fórmula de Haversine utiliza as razões trigonométricas cosseno e seno tratando a terra como uma esfera, e a partir de seu raio calcula a distância entre duas coordenadas geográficas.

Os procedimentos experimentais, realizados através de testes, foram feitos em duas áreas do Campus do Pici – Universidade Federal do Ceará, de modo a testar a distância medida e a capacidade de envio e recebimento dos dados de localização. A região tem presença de mata, com pequenas alterações de relevo e presença de prédios.

O teste 1 teve como objetivo analisar a precisão do módulo GPS acoplado a placa LoRa utilizado no módulo *Sender*. O módulo foi mantido parado de modo a verificar a variação da medição do sistema GPS e o envio das coordenadas de latitude e longitude para um mesmo ponto.

O teste 2 e 3 consistiu no posicionamento do *Receiver* em um ponto fixo e o distanciamento do módulo *Sender* dentro de um automóvel, de modo a analisar a distância (por meio da Equação 5.1) e o comportamento da transmissão durante o percurso.

No teste 4, para analisar se o posicionamento do *Gateway* em um local mais alto facilitaria a transmissão, o *Receiver* foi posicionado no 5º andar de um prédio com linha de visão para a área em teste e o módulo *Sender* foi movido por um percurso conhecido.

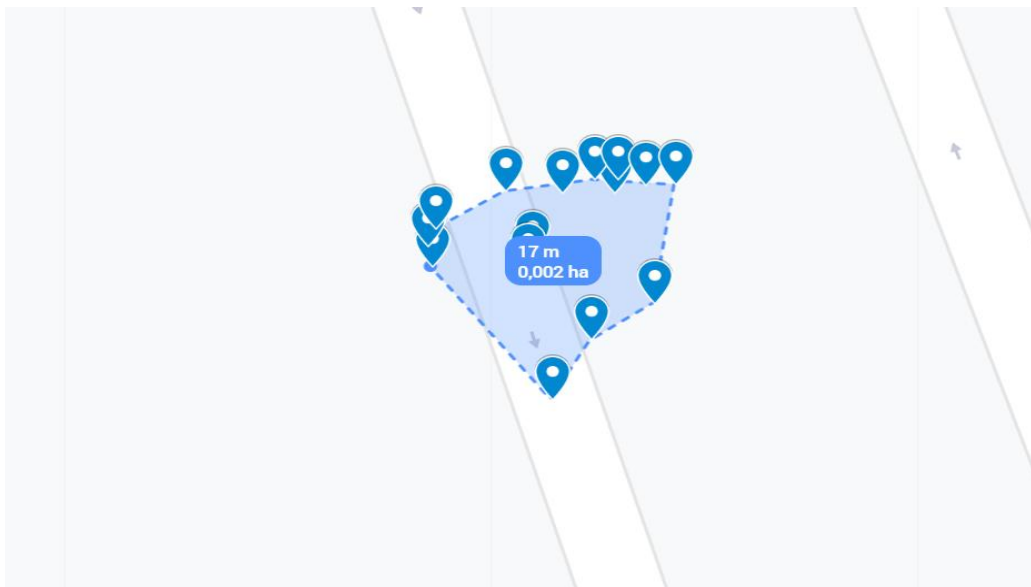
Para os testes citados, foi utilizada a ferramenta MyMaps do Google para a geração de mapas com as coordenadas de latitude e longitude geradas pelo protótipo do sistema de Minetracking.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Teste do módulo GPS

O módulo TTGO T-Beam ESP32 (*Sender*) realizou o envio de 16 dados de coordenadas de latitude e longitude para um mesmo ponto, tendo como resultados valores que variaram dentro de uma área, como mostrado na Figura 19 e na Tabela 5.

Figura 19 - Simulação do Teste.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A precisão do módulo apresentada no manual é de 2.5m. A análise das medições mostrou um erro máximo de aproximadamente 4m até o ponto médio das medições, com um desvio padrão de aproximadamente 1m, como apresentado na Tabela 5. Apesar de algumas medições apresentarem uma variação maior que a precisão do equipamento, os valores ainda estão dentro do necessário para o projeto.

Tabela 5 - Resultados do teste do módulo GPS.

Medição	Latitude	Longitude	Distância da medição ao ponto médio	
			Km	M
1	-3,74166217	-38,5759902	0,004	4,0
2	-3,74164867	-38,5759823	0,003	2,6
3	-3,74164	-38,5759695	0,003	2,6
4	-3,74163533	-38,575988	0,001	1,0
5	-3,74162867	-38,5759942	0,001	0,6
6	-3,74163167	-38,5760143	0,003	2,9
7	-3,741627	-38,5760152	0,003	2,9
8	-3,741623	-38,5760135	0,003	2,8
9	-3,74161433	-38,5759995	0,002	1,8
10	-3,74161483	-38,5759882	0,001	1,3
11	-3,74161467	-38,5759775	0,002	1,8
12	-3,74161167	-38,5759817	0,002	1,8
13	-3,74161183	-38,575977	0,002	2,1
14	-3,741613	-38,5759712	0,002	2,5
15	-3,74161283	-38,5759653	0,003	3,0
16	-3,74163183	-38,575995	0,001	0,9
Ponto Médio	-3,741626344	-38,57598891	Desvio Padrão	0,00091 0,90915355

Fonte: Elaborada pelo autor.

6.2 Teste do Protótipo em movimento

No teste 2, foi realizado um teste em movimento com o *Sender* (posicionado no marcador laranja na imagem), com recebimento de todos os dados de localização em um percurso em linha reta que totalizou 116m, como pode ser observado na Figura 20.

Figura 20 - Teste com o protótipo em movimento (1).



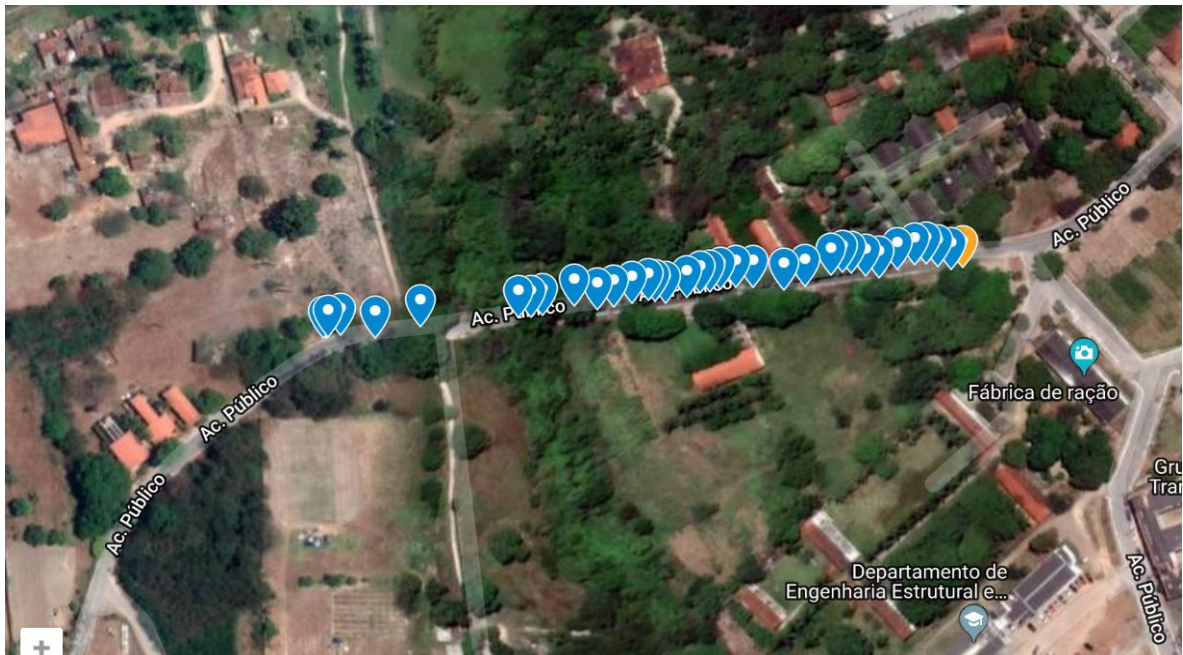
Fonte: Elaborada pelo autor.

Em comparativo do mesmo percurso no Google Maps, encontramos uma medição de 120m, totalizando um erro de medição de 4m para o resultado encontrado no protótipo.

Como pode ser observado na Figura 21, o *Receiver* foi novamente posicionado em um local (ícone laranja) e o *Sender* foi distanciado de modo a verificar o envio de dados e a distância até a perda de dados. Houve uma diminuição no recebimento dos dados no percurso final do teste, com cerca de 185m. Após a curva, não houve recepção de mais dados de localização, como pode ser observado na Figura 21. A distância encontrada pelo protótipo foi de aproximadamente 239m, enquanto que o Google Maps indicou uma distância de 240m. Apesar da perda de dados em alguns momentos, a distância medida apresentou um erro de apenas 1m.

A presença de muita vegetação é uma das causas que ocasionou a diminuição da transmissão de dados. Além disso, há regiões com desvios que aumentam o número de obstáculos da linha de visão entre o *Sender* e o *Receiver*, como é o caso da perda de dados após a curva.

Figura 21 - Teste com protótipo em movimento (2).

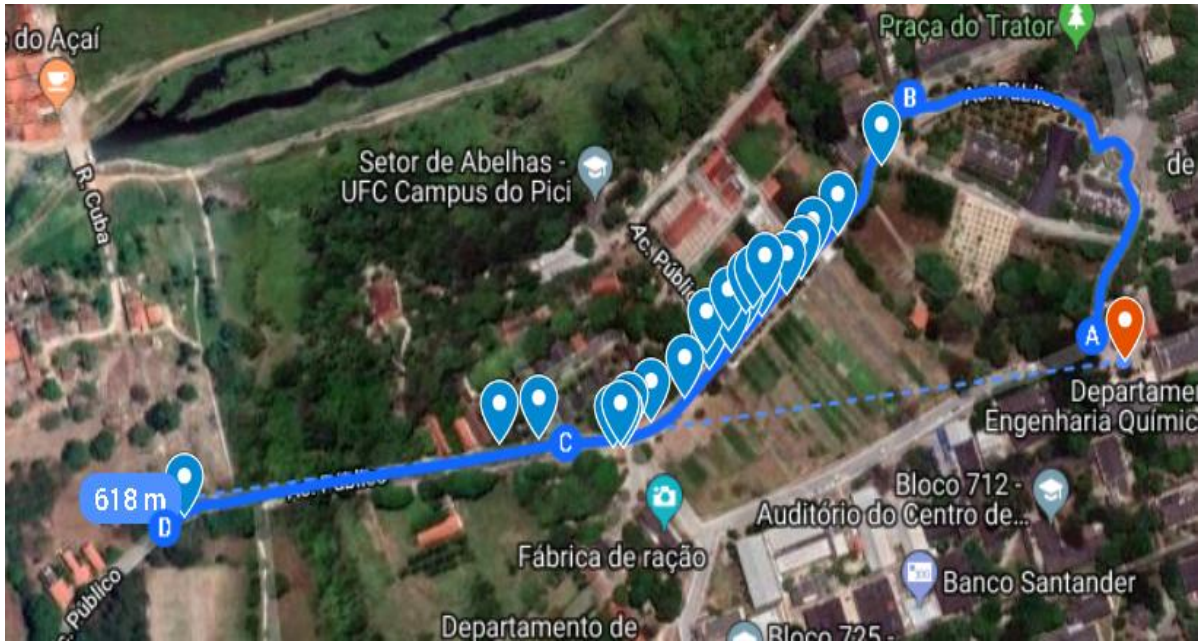


Fonte: Elaborada pelo autor.

6.3 Teste da utilização do Receiver em ponto elevado

O *Receiver* foi posicionado no ponto em laranja (Figura 22). O *Sender* foi, então, movido pelo percurso em azul A-B-C-D. Como pode ser observado, entre A e B não houve recepção de nenhum dado de localização pelo *Receiver*, o que pode ter sido ocasionado pela grande quantidade de prédios e árvores presentes nessa parte do percurso que, provavelmente, causaram interferência no receptor. A partir do ponto B, houve recebimento da localização enviada pelo *Sender*, o que pode ser explicado pela ausência de prédios e diminuição da área com vegetação, facilitando a linha de visão entre o *Sender* e o *Receiver*, possibilitando uma transmissão de localização constante no percurso B-C. Entre C-D, pode ser observada a recepção de apenas três dados de localização, o que pode ser explicado pelo aumento da presença de vegetação no local, o que gera interferência na transmissão de dados. A localização mais distante recebida foi de 618m.

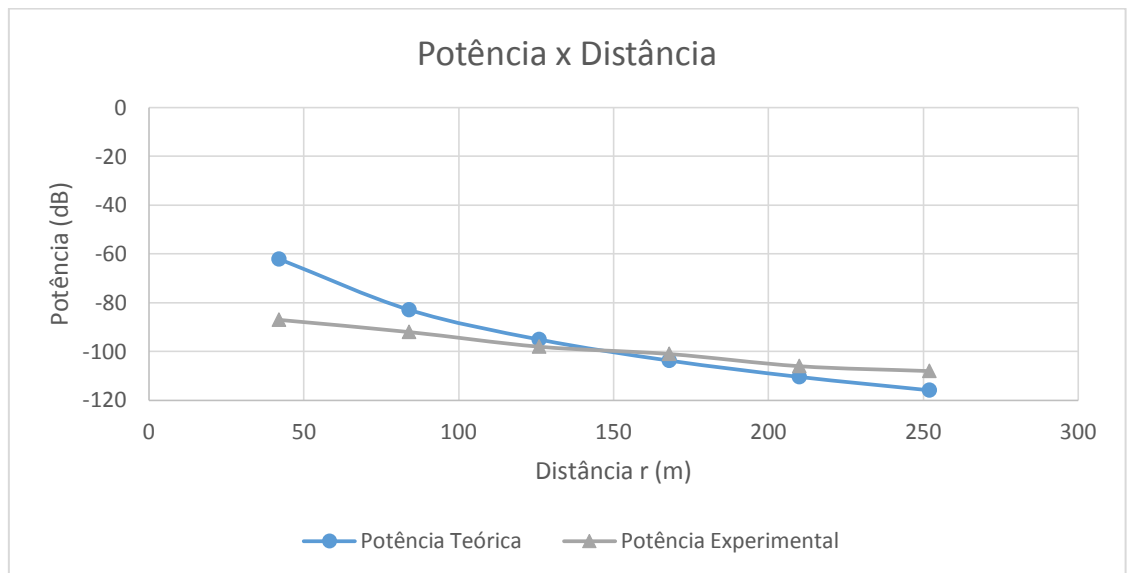
Figura 22 - Teste com o Receiver em ponto elevado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Usando a Equação 3.2 com os parâmetros $n = 3$, valor de espaço livre $\beta_0 = 50$ dB, que foi o valor da potência recebida para a distância em torno de 1 metro plotou-se uma curva teórica e comparou-se com os valores experimentais, que está na Figura 23.

Figura 23 - Potência em função da distância.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Como pode ser observado, a curva de potência experimental aproximou-se da curva de potência teórica para $n=3$, que é relativa a uma área rural (plana) por conta dos obstáculos da vegetação presentes, conforme Tabela 3. Isso demonstra que a equação 4.2 pode ser utilizada para estimar o comportamento do sinal de acordo com o meio e a distância. Também pode-se inferir que a utilização do protótipo em um ambiente livre de obstáculos ($n=2$) certamente trará um alcance maior do sinal.

Em resumo, o protótipo conseguiu realizar a troca de dados entre o dispositivo em movimento (Sender) e o dispositivo fixo (Receiver), apresentando distâncias medidas condizentes com as reais utilizando a tecnologia LoRa. Contudo, notou-se que a influência do ambiente (desvios de percurso, área com densa vegetação) fez a comunicação ser sensível, comprometendo a integridade em certos pontos. Observou-se, também, que o posicionamento do Receiver em um local mais elevado em relação à vegetação, proporcionou um resultado melhor, mostrando que a localização do gateway é um fator importante durante a instalação do projeto. A utilização de um segundo gateway poderia aumentar a taxa de recepção de dados.

7 CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi projetar e avaliar a utilização de uma rede LoRaWAN para o controle de frotas de caminhões e escavadeiras em uma mina a céu aberto.

Na análise do módulo GPS embarcado no dispositivo LoRa, verificou-se uma variação de cerca de 4m, valor aceitável para o desenvolvimento do projeto.

Na análise de transmissão, foi possível verificar o funcionamento do protótipo em enviar a latitude e longitude do veículo. Contudo, observou-se que a quantidade de obstáculos influencia bastante na troca de informações. Nos testes em que se tinha uma linha de visada direta entre os módulos LoRa obteve-se uma transmissão de dados mais constante. Nos testes com a presença de prédios ou vegetação ao redor, o que possivelmente tornava a comunicação mais sensível (visto que afeta a linha de visada) havia comprometimento da transmissão. O teste com o posicionamento do módulo *Receiver* em posição mais elevada mostrou melhores resultados, o que indica que o posicionamento do gateway é um fator bastante importante para um melhor aproveitamento na transmissão de dados.

Ainda foi possível associar a curva experimental de potência x distância a uma curva teórica de acordo com o meio em que o teste foi realizado (rural – plano), obtendo-se valores próximos. A curva do gráfico pode ser utilizada como ferramenta de análise para a inferência do comportamento da potência em função da distância em outros meios de utilização, o que indica que a utilização do módulo em uma região sem a presença de muita vegetação e prédios, como o encontrado em minas a céu aberto, é possível.

Com base no estudo feito, percebe-se que a tecnologia LoRa pode ser utilizada para o desenvolvimento de um sistema Minetracking, que é uma importante ferramenta para o controle de processos.

Para trabalhos futuros, indica-se a verificação do comportamento e das variáveis de funcionamento mediante o uso de um maior número de dispositivos, e considerando se a transmissão de sinal entre os módulos será afetada, visto que no atual trabalho apenas se dispunha de dois módulos para teste.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, Antônio José Rodrigues do; LIMA, Clóvis Ático Filho. **Mineração**. Disponível em: <http://www.dnpm-pe.gov.br/Geologia/Mineracao.php>. Acesso em: 20. ago. 2019.
- BORGES, Thiago Campos. **Análise dos custos operacionais de produção no dimensionamento de frotas de carregamento e transporte em mineração**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013. Disponível em: https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/3411/1/DISSERTA%c3%87%c3%83O_%20An%c3%a1liseCustoOperacionais.pdf. Acesso em: 10. ago. 2019.
- COSTA, Rafael Henrique Pereira da. **Análise da aplicação de um software *dispatch* no sistema de transporte de uma mineradora**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Logística Estratégica e Sistemas de Transporte) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-9C4KAF/1/monografia_final_pos_gradua__o_rafael.pdf. Acesso em: 12. ago.2019
- FELSCH JUNIOR, W. S. **Análise do desempenho dos operadores de equipamentos de mina e simulação de cenários futuros de lavra: estudo de caso - Mina Casa de Pedra – Congonhas, MG**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014. Disponível em: https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/4033/1/DISSERTA%c3%87%c3%83O_An%c3%a1liseDesempenhoOperadores.pdf. Acesso em: 12. ago. 2019
- INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Informações sobre a economia mineral brasileira 2015**. Brasília: IBRAIM, 2015. Disponível em: <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00005957.pdf>, Acesso em: 15. ago. 2019
- LOPES, Elison Batista. **Proposta de arranjo físico para redução de distância média de transporte (DMT): um estudo de caso em uma empresa produtora de calcário na região Centro-Oeste de Minas**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) - Centro Universitário de Formiga, UNIFOR-MG, Formiga, 2014. Disponível em: <https://repositorioinstitucional.uniformg.edu.br:21074/xmlui/bitstream/handle/123456789/278/TCC%20-%20ELISON%20LOPES.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 30. ago. 2019
- MEDEIROS, Emmanuel Leite de. **Desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados em rede hídrica de comunicação de uma planta hidráulica focado em LoRa**. 2018. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018. Disponível em: http://www.cear.ufpb.br/arquivos/cgee/TCC/TCC_-_Emmanuel_Leite_de_Medeiros_-_Vers%C3%A3o_Final.pdf. Acesso em: 13. set. 2019

NEWMAN, Alexandra & Rubio, Enrique & Caro, Rodrigo & Weintraub, Andres & Eureka, Kelly. A Review of Operations Research in Mine Planning. **Interfaces**, [s. l.], v. 40, n. 3, p. 222–245, May. /June. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1287/inte.1090.0492>. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/6e8d/bd730955707bf4a704f9568ec2d52f249347.pdf>. Acesso em: 16. set. 2019

REYNDERS, Brecht; WANG, Qing; POLLIN, Soie. A LoRaWAN Module for ns-3: Implementation and Evaluation. *In: **Proceedings of the 2018 Workshop on ns-3 (WNS3 2018)***. Association for Computing Machinery, Surathkal, India, p. 61-68, 2018. Disponível em: https://limo.libis.be/primo-explore/fulldisplay?docid=LIRIAS2243245&context=L&vid=Lirias&search_scope=Lirias&tab=default_tab&lang=en_US&fromSitemap=1. Acesso em: 18. set. 2019.

ROCHA, Luciano Gustavo Martins; CHAVES, Sisley Miller de Freitas; SANTOS, Rita de Cássia Pedrosa. Estudo da influência do carregamento e transporte através do dimensionamento de frota. **Pensar Engenharia**, Belo Horizonte, v. 4, n. 2, jul. 2016. Disponível em: <http://revistapensar.com.br/engenharia/artigo/no=a181.pdf>. Acesso em: 18. set. 2019

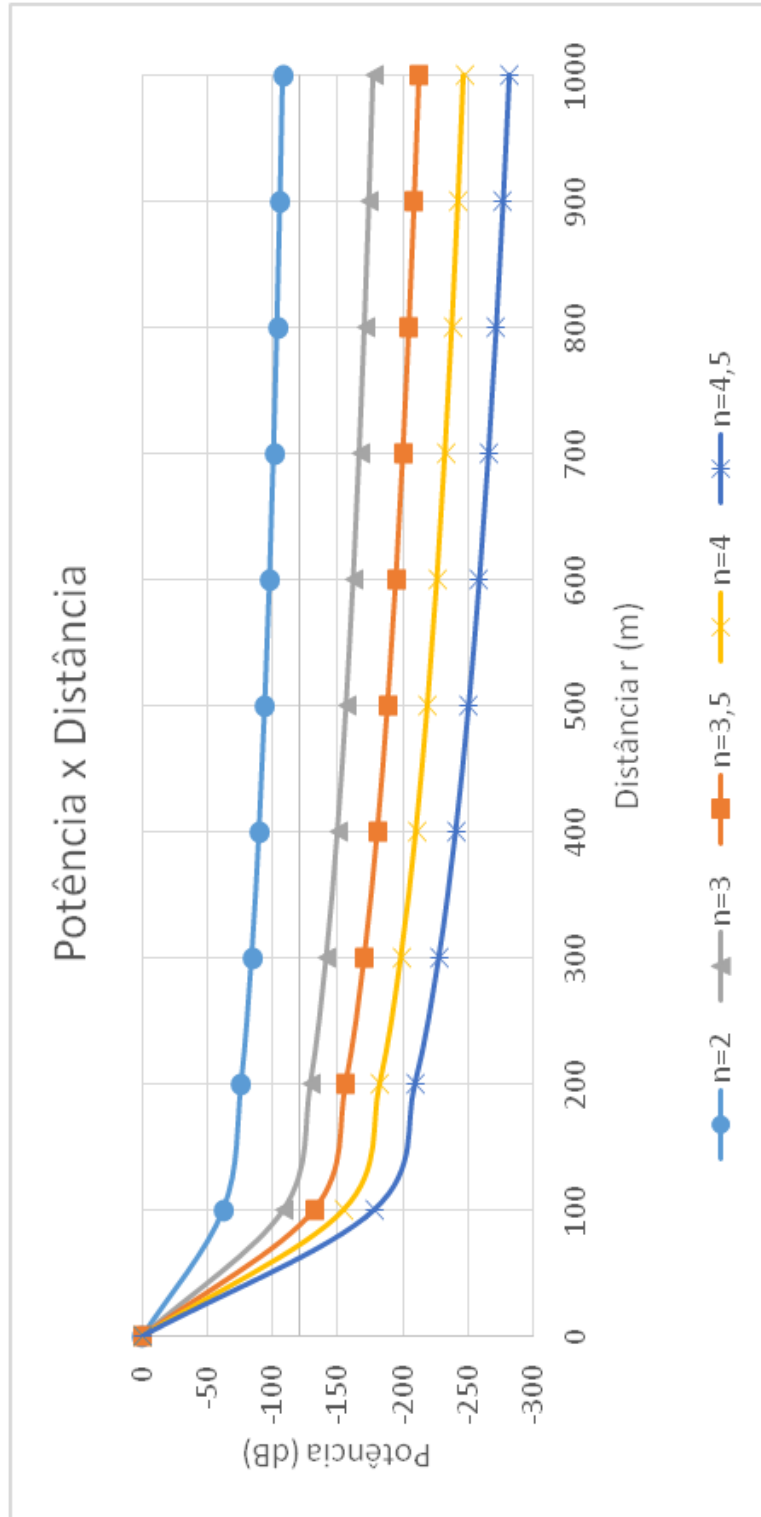
RODOVALHO, Edmo da Cunha. **An innovative approach for controlling operational parameters in open pit mining to reduce costs and environmental impacts**. 2017. Tese (Doutorado em Ciências - Engenharia Mineral) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-18012017-151352/publico/EdmodaCunhaRodovalhoCorr17.pdf>. Acesso em: 20. ago. 2019

RODRIGUES, Lásara Fabrícia. **Análise comparativa de metodologias utilizadas no despacho de caminhões em minas a céu aberto**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/NVEA-72CKG8/1/l_sara_fabricia_rodrigues.pdf. Acesso em: 22. ago. 2019

SARAIVA, Leonan da Silva. **Projeto de hardware e software para dispositivos finais em uma rede LoRaWAN**. 2017. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Telecomunicações) - Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, São José, 2017. Disponível em: <https://docplayer.com.br/72437848-Projeto-de-hardware-e-software-para-dispositivos-finais-em-uma-rede-lorawan.html>. Acesso em: 30. set. 2019

APÊNDICES

APÊNDICE A – Curva Característica



Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE B – Teste 1

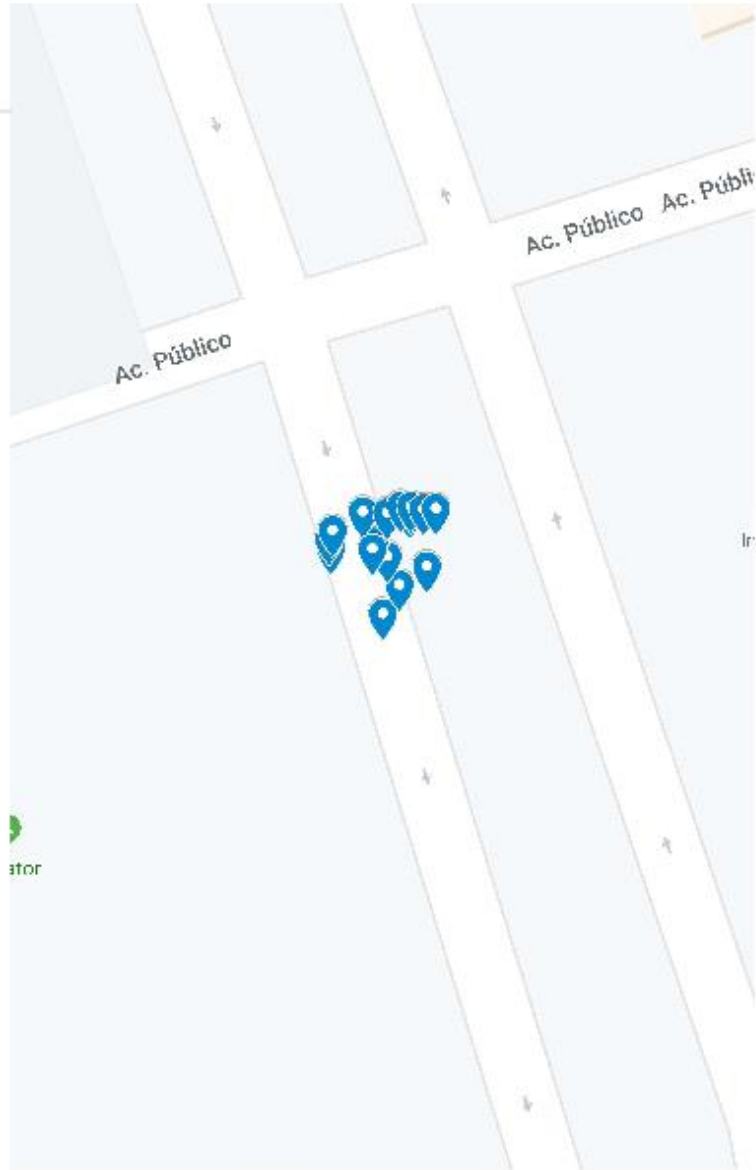
02/12/2019

Teste 1

Teste 1

Dados 7983 - 7998

Todos os itens



<https://www.google.com/maps/@-17.41724,-48.676...>

Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE C – Teste 2

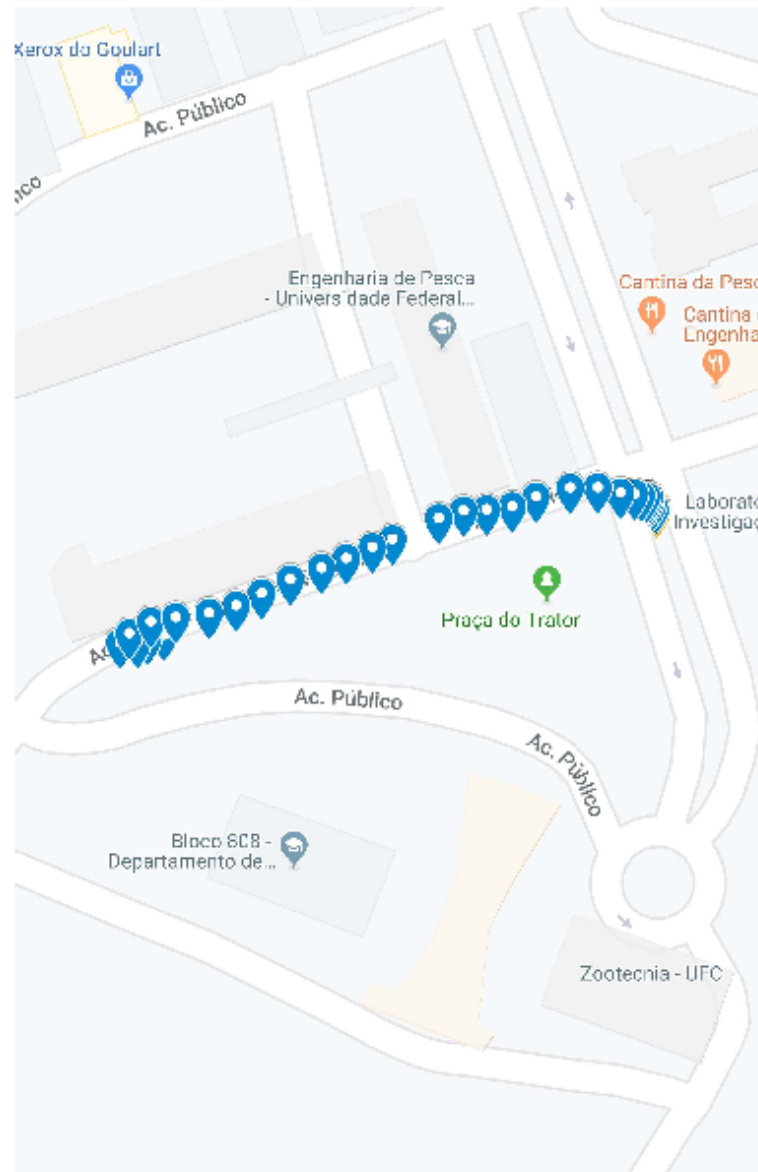
02/12/2019

Teste 2

Teste 2

Dados 8022 - 8054

- 📍 -3.7416865
- 📍 -3.741627667
- 📍 -3.741621667
- 📍 -3.741615
- 📍 -3.741612667
- 📍 -3.741608
- 📍 -3.741607167
- 📍 -3.741605333
- 📍 -3.741602167
- 📍 -3.741600167
- 📍 -3.74159
- 📍 -3.741591
- 📍 -3.741607833
- 📍 -3.7416295
- 📍 -3.741631667
- 📍 -3.741633667
- 📍 -3.741647667
- 📍 -3.741687
- 📍 -3.741702
- 📍 -3.741722833
- 📍 -3.741740833
- 📍 -3.741762833
- 📍 -3.741788167
- 📍 -3.741810833
- 📍 -3.741825167
- 📍 -3.741865
- 📍 -3.741873833
- 📍 -3.741879833
- 📍 -3.7418805
- 📍 -3.741863333
- 📍 -3.7418415
- 📍 -3.741833



<https://www.google.com/maps/@-3.7420052,-50.9157...> 1/1

Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE D – Teste 3

08/12/2019

Teste 3

Teste 3

Dados 8519 - 8583

- 📍 -8.743763667
- 📍 -8.743769167
- 📍 -8.743797333
- 📍 -8.743744883
- 📍 -8.7437496
- 📍 -8.743767883
- 📍 -8.743797883
- 📍 -8.743792
- 📍 -8.743783667
- 📍 -8.7437786
- 📍 -8.743787883
- 📍 -8.743880883
- 📍 -8.743848167
- 📍 -8.743837833
- 📍 -8.743899667
- 📍 -8.743842
- 📍 -8.743860667
- 📍 -8.743866667
- 📍 -8.743873333
- 📍 -8.743895167
- 📍 -8.743899667
- 📍 -8.743883167
- 📍 -8.7438946
- 📍 -8.7438106
- 📍 -8.7439235
- 📍 -8.743908833
- 📍 -8.7439466
- 📍 -8.743960883
- 📍 -8.743960167
- 📍 -8.743987667
- 📍 -8.744019333
- 📍 -8.7440286
- 📍 -8.744028
- 📍 -8.744025883
- 📍 -8.744029883



<https://www.google.com/maps/@-8.743873333,-8.743873333,15z>

Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE E – Teste 4

02/12/2019

Teste 4

Teste 4

Dados 8474 - 8634

- 📍 -3.743285667 -38.57589138
- 📍 -3.742901167 -38.57732238
- 📍 -3.742692867 -38.57758783
- 📍 -3.7427866 -38.57772483
- 📍 -3.742983883 -38.5779005
- 📍 -3.742968883 -38.57798588
- 📍 -3.743064667 -38.57802617
- 📍 -3.7431355 -38.57812117
- 📍 -3.7432258 -38.578229
- 📍 -3.743329883 -38.578394
- 📍 -3.743475 -38.578491
- 📍 -3.7435945 -38.5786517
- 📍 -3.7436655 -38.57880817
- 📍 -3.743712867 -38.57884187
- 📍 -3.743721883 -38.57884188
- 📍 -3.743724883 -38.57884388
- 📍 -3.743720667 -38.57890517
- 📍 -3.743702883 -38.57886767
- 📍 -3.743240167 -38.57820817
- 📍 -3.744079867 -38.5814276

Dados 8635 - 8642

- 📍 -3.743704167 -38.57957888
- 📍 -3.743685883 -38.5796267
- 📍 -3.7432405 -38.578351
- 📍 -3.7431966 -38.57823217
- 📍 -3.7430605 -38.57812983
- 📍 -3.743016167 -38.57808188
- 📍 -3.742962883 -38.5780185



<https://www.google.com/maps/@-3.743704167,-38.57957888,15z> 1/1

Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE F – Tabela de Custos

DESCRIÇÃO	VALOR (R\$)
TTGO T-beam ESP32	R\$ 217,00
Antena AP3900	R\$ 105,00
Módulo ESP32-D0WDQ6	R\$ 119,00
Antena Omnidirecional	R\$ 32,00
Bateria Recarregável Ultra Fire 18650	R\$ 29,00
TOTAL	R\$ 502,00

Fonte: Elaborada pelo autor.