



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
CECAU - COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA
DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO**



MATHEUS HENRIQUE DE MOURA DIAS LOPES

**ANÁLISE DO POTENCIAL DE SISTEMAS HÍBRIDOS *LORAWAN* - *EDGE*
COMPUTING PARA APRIMORAMENTO DA EFICIÊNCIA E SEGURANÇA EM
OPERAÇÕES DE MINERAÇÃO SUBTERRÂNEA**

**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO**

**OURO PRETO
2025**

MATHEUS HENRIQUE DE MOURA DIAS LOPES

**ANÁLISE DO POTENCIAL DE SISTEMAS HÍBRIDOS *LORAWAN* - *EDGE*
COMPUTING PARA APRIMORAMENTO DA EFICIÊNCIA E SEGURANÇA EM
OPERAÇÕES DE MINERAÇÃO SUBTERRÂNEA**

**Monografia apresentada ao Curso de
Engenharia de Controle e Automação
da Universidade Federal de Ouro Preto
como parte dos requisitos para a
obtenção do Grau de Engenheiro de
Controle e Automação.**

Orientadora: Prof. Dra. Rita de Cassia Pedrosa Santos

Coorientador: Prof. Dr. Danny Augusto Vieira Tonidandel

Ouro Preto
2025



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CONTROLE E
AUTOMACAO



FOLHA DE APROVAÇÃO

Matheus Henrique de Moura Dias Lopes

**Análise do Potencial de Sistemas Híbridos Lora Wan-Edge Computing
para Aprimoramento da Eficiência e Segurança em Operações de Mineração Subterrânea**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação

Aprovado em 04 de setembro de 2025.

Integrantes da banca

[Doutora] - Rita de Cássia Pedrosa Santos - (Universidade Federal de Ouro Preto)

[Doutor] - Danny Augusto Vieira Tonidandel - (Universidade Federal de Ouro Preto)

[Doutor] - Elton Destro - (Universidade Federal de Ouro Preto)

[Doutor] - Fernando Cortez Sica - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Danny Augusto Vieira Tonidandel, coorientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 08/09/2025.



Documento assinado eletronicamente por **Danny Augusto Vieira Tonidandel, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/09/2025, às 18:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0971957** e o código CRC **7954325F**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.011234/2025-36

SEI nº 0971957

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163
Telefone: 3135591533 - www.ufop.br

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Christiane e Reivaldo (*in memoriam*), pelo amor incondicional, dedicação e ensinamentos que sempre me guiaram.

Aos meus irmãos, Reivaldo Jr. e Thallyta, pela força, apoio e carinho em todos os momentos.

À Rafaela, por estar sempre ao meu lado.

Estendo meus agradecimentos a toda a minha família, presença constante. Aos meus amigos, que me acompanharam em diferentes fases desta jornada.

À Escola de Minas, à UFOP e a todos os professores pelo ensino de qualidade.

À minha orientadora, Prof.^a Rita de Cassia Pedrosa Santos, pela paciência e ensinamentos ao longo do meu curso, contribuindo não apenas para meu crescimento acadêmico, mas também pessoal e profissional.

Por fim, a República Sparta, a todos os ex-alunos e moradores, vida longa.

RESUMO

A mineração subterrânea apresenta índices de fatalidade significativamente superiores a outros setores industriais, demandando soluções tecnológicas para aprimoramento da segurança operacional. Este trabalho analisa o potencial de sistemas híbridos *LoRaWAN - Edge Computing* para aprimoramento da eficiência e segurança em operações de mineração subterrânea. A metodologia adotada é qualitativa exploratória, baseada em revisão sistemática da literatura técnico-científica em bases de dados acadêmicas, análise comparativa entre tecnologias de comunicação sem fio e paradigmas computacionais, investigação de casos documentados e síntese integrativa dos resultados. A fundamentação teórica aborda as características técnicas da tecnologia *LoRaWAN*, baseada na modulação *Chirp Spread Spectrum* (CSS), e do *Edge Computing* como paradigma computacional distribuído que aproxima o processamento dos locais de geração de dados. A análise dos requisitos tecnológicos específicos da mineração subterrânea considera as exigências da NR-22 e condições operacionais únicas destes ambientes. O estudo examina casos representativos incluindo implementações em minas de carvão indianas, metodologias colombianas de otimização e desenvolvimentos brasileiros de soluções de baixo custo. A análise comparativa evidencia que a integração *LoRaWAN - Edge Computing* supera limitações individuais de cada tecnologia, proporcionando comunicação de longo alcance com baixo consumo energético e processamento local autônomo. Os resultados demonstram viabilidade técnica da arquitetura híbrida para aplicações em ambientes subterrâneos com conectividade limitada. As diretrizes propostas incluem roteiro estruturado de implementação, considerações técnicas críticas e gestão de riscos. Com base no trabalho conclui-se que sistemas híbridos *LoRaWAN - Edge Computing* oferecem solução promissora para transformação dos paradigmas de segurança e eficiência em mineração subterrânea, criando sinergias que amplificam capacidades de monitoramento inteligente e comunicação resiliente.

Palavras-chave: *LoRaWAN. Edge Computing. Mineração Subterrânea. Internet das Coisas. Sistemas Híbridos.*

ABSTRACT

Underground mining presents fatality rates significantly higher than other industrial sectors, demanding technological solutions to improve operational safety. This work analyzes the potential of hybrid *LoRaWAN* - Edge Computing systems for enhancing efficiency and safety in underground mining operations. The methodology adopted is qualitative exploratory, based on systematic review of technical-scientific literature in academic databases, comparative analysis between wireless communication technologies and computational paradigms, investigation of documented cases, and integrative synthesis of results. The theoretical foundation addresses the technical characteristics of *LoRaWAN* technology, based on *Chirp* Spread Spectrum (CSS) modulation, and Edge Computing as a distributed computational paradigm that brings processing closer to data generation locations. The analysis of specific technological requirements for underground mining considers NR-22 regulations and unique operational conditions of these environments. The study examines representative cases including implementations in Indian coal mines, Colombian optimization methodologies, and Brazilian developments of low-cost solutions. Comparative analysis demonstrates that *LoRaWAN* - Edge Computing integration overcomes individual limitations of each technology, providing long-range communication with low energy consumption and autonomous local processing. Results demonstrate technical feasibility of the hybrid architecture for applications in underground environments with limited connectivity. The proposed guidelines include structured implementation roadmap, critical technical considerations, and risk management. It is concluded that hybrid *LoRaWAN* - Edge Computing systems offer a promising solution for transforming safety and efficiency paradigms in underground mining, creating synergies that amplify intelligent monitoring and resilient communication capabilities.

Keywords: *LoRaWAN*. Edge Computing. Underground Mining. Internet of Things. Hybrid Systems.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Etapas Metodológicas da Pesquisa	11
Figura 2 - Arquitetura de Rede em Estrela <i>LoRaWAN</i> para Mineração Subterrânea	16
Figura 3 - Comparação entre Arquitetura em Estrela (<i>LoRaWAN</i>) e Rede <i>Mesh</i>	17
Figura 4 - Arquitetura Técnica do Protocolo <i>LoRaWAN</i> para Mineração Subterrânea	18
Figura 5 - Desempenho de comunicação <i>LoRaWAN</i> por <i>Spreading Factor</i> em ambientes com e sem obstáculos	20
Figura 6 - Protótipo desenvolvido para testes de transmissão via LoRa em ambiente subterrâneo	25
Figura 7- Arquitetura Integrada <i>LoRaWAN</i> - <i>Edge Computing</i> em Mineração Subterrânea.....	29
Figura 8 - Distribuição otimizada de sensores <i>LoRaWAN</i>	39
Figura 9 - Diagrama de Alcance e Densidade de Infraestrutura entre Tecnologias de Comunicação em Mineração Subterrânea	43
Figura 10 - Configurações de Desenvolvimento em Mineração Subterrânea	47
Figura 11- Diagrama Simplificado <i>LoRa</i> - <i>Edge Computing</i> para Mineração Subterrânea.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Frequências LoRaWAN por Região e Aplicação Documentada	19
Tabela 2 - Composição e Propriedades dos Solos Testados.....	22
Tabela 3 - Comparação de Tecnologias LPWA para Aplicações em Mineração Subterrânea.....	23
Tabela 4 - Comparação das principais arquiteturas de referência para Edge Computing na Indústria 4.0	26
Tabela 5 - Classificação de Parâmetros Críticos e Não Críticos para Monitoramento em Mineração Subterrânea	34
Tabela 6 - Dados Experimentais do Sistema UGMD: Limites Críticos e Ações Automáticas Verificadas.....	36
Tabela 7 - Espaçamento de Dispositivos LoRaWAN em Mineração Subterrânea Baseado em Condições de Propagação	38
Tabela 8 - Principais Parâmetros Documentados - Tecnologias de Comunicação IoT	44

LISTA DE ABREVIATURAS

ADR - *Adaptive Data Rate*

ANATEL - Agência Nacional de Telecomunicações

ARM - *Advanced RISC Machine*

ATEX - *Atmosphères Explosives*

CDC - *Centers for Disease Control and Prevention*

CSS - *Chirp Spread Spectrum*

DLT - *Distributed Ledger Technologies*

FCC - *Federal Communications Commission*

IIC - *Industrial Internet Consortium*

IIoT - *Industrial Internet of Things*

IoT - *Internet of Things*

IoUT - *Internet of Underground Things*

ISM - *Industrial, Scientific and Medical*

LPWA - *Low Power Wide Area Networks*

LOS - *Line of Sight*

LoRa - *Long Range*

LoRaWAN - *Long Range Wide Area Network*

LTE-M - *Long Term Evolution for Machines*

MAC - *Medium Access Control*

NB-IoT - *Narrowband Internet of Things*

NLOS - *Non-Line of Sight*

NR - Norma Regulamentadora

PGR - Programa de Gerenciamento de Riscos

RSSI - *Received Signal Strength Indicator*

SF - *Spreading Factor*

SNR - *Signal-to-Noise Ratio*

UGMD - *Underground Gas Monitoring Device*

UG2AG - *Underground to Aboveground*

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	8
1.1 Objetivo Geral	10
1.2 Objetivos específicos	10
1.3 Metodologia	10
1.4 Justificativa	12
1.5 Estrutura do Trabalho	13
CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1 Tecnologia <i>LoRaWAN</i>	15
2.2 <i>Edge Computing</i>	25
2.3 Integração <i>LoRaWAN</i> - <i>Edge Computing</i>	28
2.4 Desafios e Limitações	31
CAPÍTULO 3 - DESAFIOS E REQUISITOS TECNOLÓGICOS EM MINERAÇÃO SUBTERRÂNEA	34
3.1 Requisitos Operacionais e Normativos	34
3.2 Densidade e Distribuição de Sensores	37
3.3 Capacidades de Processamento Distribuído	39
3.4 Requisitos de Comunicação e Resiliência	40
3.5 Sustentabilidade Energética	41
3.6 Adaptabilidade e Evolução	41
CAPÍTULO 4 - ANÁLISE COMPARATIVA E SINERGIAS TECNOLÓGICAS	43
4.1 Desempenho Comparativo de Tecnologias de Comunicação	43
4.2 Paradigmas de Processamento e suas Implicações	45
4.3 Arquiteturas de Referência Validadas	46
4.4 Viabilidade Econômica	48
CAPÍTULO 5 - ESTUDOS DE CASO REPRESENTATIVOS	49
5.1 Sistema de Monitoramento em Minas de Carvão Indianas	49
5.2 Metodologia de Implementação Otimizada na Colômbia	50
5.3 Desenvolvimento de Soluções de Baixo Custo no Brasil	51
CAPÍTULO 6 - SÍNTESE E DIRETRIZES CONCEITUAIS PARA IMPLEMENTAÇÃO	53
6.1 Roteiro Estruturado de Implementação	53
6.2 Considerações Técnicas Críticas	54
6.3 Fatores Organizacionais e Humanos	55
6.4 Gestão de Riscos e Sustentabilidade	56
6.5 Perspectivas e Direções Futuras	57
6.6 Considerações Finais	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

A indústria de mineração enfrenta desafios sem precedentes na era digital, impulsionada pela necessidade de conciliar a crescente demanda por recursos minerais com requisitos rigorosos de segurança, sustentabilidade e eficiência operacional. A mineração subterrânea permanece como uma das atividades industriais com maior índice de fatalidades, registrando taxas de mortalidade significativamente superiores a outros setores (SADEGHI; SOLTANMOHAMMADLOU; NASIRZADEH, 2022). Esta realidade crítica demanda a implementação urgente de tecnologias disruptivas capazes de transformar fundamentalmente os paradigmas operacionais tradicionais.

A convergência entre as tecnologias emergentes da Indústria 4.0 e os desafios específicos da mineração subterrânea tem impulsionado o desenvolvimento de soluções inovadoras baseadas na Internet das Coisas (*IoT*). Entre essas tecnologias, destaca-se o potencial sinérgico dos sistemas híbridos que combinam a tecnologia *Long Range Wide Area Network (LoRaWAN)* com *Edge Computing*, oferecendo capacidades únicas para o monitoramento inteligente, comunicação resiliente e gestão ecoeficiente de operações subterrâneas (MUSONDA *et al.*, 2024).

As redes *LoRaWAN* têm demonstrado características adequadas para ambientes industriais desafiadores, proporcionando comunicação de longo alcance com baixo consumo energético e alta penetrabilidade em estruturas subterrâneas. Paralelamente, a computação de borda (*Edge Computing*) oferece capacidades de processamento distribuído que reduzem latência, aumentam a confiabilidade dos sistemas e possibilitam tomadas de decisão autônomas em tempo real (RAZA; KULKARNI; SOORIYABANDARA, 2017). Os ambientes de mineração subterrânea apresentam complexidades técnicas e operacionais que dificultam a aplicação de soluções tecnológicas convencionais.

Os principais desafios incluem limitações de infraestrutura de comunicação devido às características geológicas e topográficas das escavações subterrâneas, necessidade de monitoramento contínuo de parâmetros críticos de segurança, requisitos de comunicação em tempo real para sistemas de alerta e resposta a emergências, demandas crescentes por sustentabilidade e eficiência energética nas operações, e necessidade de integração de múltiplos sistemas heterogêneos para

operação coordenada (KUMAR; PAUL; ANANDA, 2023).

As tecnologias de comunicação tradicionais, como sistemas cabeados e redes sem fio de curto alcance (*Wi-Fi*, *Zigbee*, *Bluetooth*), apresentam limitações significativas em ambientes subterrâneos, incluindo vulnerabilidade a danos físicos, cobertura limitada, alta susceptibilidade a interferências e custos elevados de instalação e manutenção (SADEGHI; SOLTANMOHAMMADLOU; NASIRZADEH, 2022). Simultaneamente, as soluções baseadas exclusivamente em computação centralizada em nuvem enfrentam desafios críticos de latência, disponibilidade de conectividade e dependência de infraestrutura externa.

A investigação de sistemas híbridos *LoRaWAN* - *Edge Computing* para mineração subterrânea justifica-se por múltiplas dimensões estratégicas e técnicas. Primeiramente, a necessidade imperativa de reduzir os índices de acidentes e fatalidades na mineração subterrânea demanda soluções tecnológicas que proporcionem monitoramento contínuo, detecção precoce de riscos e resposta autônoma a situações críticas.

Do ponto de vista tecnológico, a hibridização de *LoRaWAN* com *Edge Computing* oferece potencial para superar as limitações individuais de cada tecnologia, criando sinergias que amplificam as capacidades de inteligência, resiliência e ecoeficiência dos sistemas. A integração com *Edge Computing* possibilita o processamento local de dados críticos, reduzindo a dependência de conectividade externa, minimizando latências e aumentando a resiliência dos sistemas através de capacidades de tomada de decisão distribuída. Esta abordagem híbrida alinha-se com os princípios da mineração inteligente (*Smart Mining*) e contribui para os objetivos de sustentabilidade e responsabilidade social corporativa do setor.

Apesar do crescente interesse em tecnologias *IoT* para mineração, existe uma lacuna significativa na literatura acadêmica e técnica quanto à análise sistemática do potencial de sistemas híbridos *LoRaWAN* - *Edge Computing* especificamente aplicados a operações de mineração subterrânea. As pesquisas existentes tendem a abordar essas tecnologias de forma isolada ou focam em aplicações de superfície, não contemplando adequadamente as complexidades específicas dos ambientes subterrâneos.

Esta lacuna é parcialmente endereçada pelos trabalhos de Santos (2020) e Silva (2022), que investigaram respectivamente soluções *IoT* para monitoramento de minas subterrâneas e dispositivos vestíveis tecnológicos para mineração, fornecendo

base prática para investigação de sistemas híbridos mais complexos como os propostos neste trabalho.

Estudos recentes têm demonstrado a viabilidade técnica do *LoRaWAN* em alguns contextos de mineração (KUMAR; PAUL; ANANDA, 2023), enquanto outras pesquisas exploram aplicações de *Edge Computing* em ambientes industriais diversos. Contudo, falta uma análise abrangente que examine: (i) as sinergias específicas entre essas tecnologias em contextos subterrâneos; (ii) os impactos integrados nos aspectos de inteligência operacional, resiliência sistêmica e ecoeficiência; (iii) os requisitos arquiteturais para implementação efetiva; e (iv) os desafios e oportunidades de escalabilidade.

1.1 Objetivo Geral

Analisar o potencial de sistemas híbridos *LoRaWAN* - *Edge Computing* para o aprimoramento da eficiência e segurança em operações de mineração subterrânea por meio de revisão sistemática da literatura, análise comparativa de tecnologias e estudo de casos representativos.

1.2 Objetivos específicos

- a) Caracterizar tecnicamente as tecnologias *LoRaWAN* e *Edge Computing*, identificando suas capacidades, limitações e adequação para ambientes de mineração subterrânea;
- b) Analisar os desafios e requisitos para implementação de sistemas *IoT* em mineração subterrânea;
- c) Investigar implementações de sistemas *IoT* direcionados para mineração subterrânea;
- d) Propor diretrizes conceituais e recomendações para implementação prática dos sistemas híbridos investigados.

1.3 Metodologia

Esta pesquisa adota uma abordagem metodológica qualitativa de caráter exploratório e descritivo, fundamentada na análise sistemática da literatura técnico-

científica e na investigação comparativa de tecnologias aplicadas à mineração subterrânea.

O método de pesquisa compreende quatro etapas principais (Figura 1).

Figura 1- Etapas Metodológicas da Pesquisa



Fonte: Elaboração própria (2025)

Inicialmente, será conduzida uma revisão bibliográfica sistemática em bases de dados acadêmicas (*IEEE Xplore*, *ScienceDirect*, *Scopus*, *Web of Science*) utilizando descritores específicos relacionados a *LoRaWAN*, *Edge Computing*, mineração subterrânea e Internet das Coisas (*IoT*). Esta etapa visa identificar o estado da arte das tecnologias estudadas e mapear suas aplicações no contexto minerário.

Na segunda etapa, será realizada uma análise técnica comparativa entre diferentes tecnologias de comunicação sem fio e paradigmas computacionais, avaliando suas adequações aos requisitos específicos de ambientes subterrâneos em termos de alcance, consumo energético, confiabilidade e capacidade de processamento.

A terceira etapa consiste na investigação de casos de aplicação documentados na literatura, analisando implementações práticas de sistemas *IoT* em mineração e identificando padrões, desafios e soluções adotadas. Esta análise permitirá compreender os requisitos operacionais reais e as limitações tecnológicas enfrentadas.

Por fim, será conduzida uma síntese integrativa dos resultados obtidos, identificando as sinergias entre as tecnologias *LoRaWAN* e *Edge Computing* e delineando diretrizes conceituais para sua aplicação coordenada em operações de mineração subterrânea. A análise culminará na proposição de recomendações técnicas baseadas nas evidências coletadas.

1.4 Justificativa

A investigação de sistemas híbridos *LoRaWAN* - *Edge Computing* para mineração subterrânea justifica-se pela convergência de demandas críticas de segurança, sustentabilidade e eficiência operacional que caracterizam os desafios contemporâneos da indústria mineral. As estatísticas de acidentes demonstram a urgência de transformação tecnológica no setor, com a mineração subterrânea apresentando riscos significativamente superiores a outras atividades industriais e mesmo à mineração de superfície (U.S. BUREAU OF LABOR STATISTICS, 2023; CDC, 2009).

Do ponto de vista científico e tecnológico, existe uma lacuna significativa na literatura acadêmica quanto à análise sistemática da integração entre *LoRaWAN* e *Edge Computing* especificamente aplicada aos ambientes subterrâneos de mineração. Embora estas tecnologias tenham sido investigadas individualmente, sua aplicação sinérgica em contextos subterrâneos permanece pouco explorada, especialmente considerando as características únicas destes ambientes que exigem soluções específicas de comunicação e processamento (MUSONDA *et al.*, 2024; LIU *et al.*, 2021).

A relevância prática desta pesquisa fundamenta-se na necessidade de desenvolver sistemas que possam operar autonomamente em ambientes onde as limitações de conectividade e processamento são críticas. Os desafios computacionais impostos pela heterogeneidade de dados e restrições energéticas dos dispositivos *IoT* em mineração subterrânea demandam arquiteturas híbridas capazes de equilibrar processamento local e comunicação eficiente (LIU *et al.*, 2021; FANG *et al.*, 2019).

Esta investigação contribui para a consolidação dos princípios da Indústria 4.0 no setor mineral, alinhando-se com as tendências globais de digitalização e automação. O desenvolvimento de sistemas inteligentes para mineração subterrânea

representa não apenas avanço tecnológico, mas também evolução necessária para atender requisitos crescentes de segurança operacional e responsabilidade socioambiental (CHENG *et al.*, 2021).

A caracterização técnica dos sistemas híbridos propostos pode ainda subsidiar o desenvolvimento de marcos regulatórios específicos para tecnologias *IoT* em mineração, contribuindo para a evolução das normas de segurança ocupacional. Estudos demonstram correlações entre características operacionais e gravidade de acidentes, evidenciando a necessidade de sistemas de monitoramento mais abrangentes e inteligentes (BARAZA *et al.*, 2023).

1.5 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado em seis capítulos. O Capítulo 1 apresenta a introdução ao tema, contextualizando os desafios da mineração subterrânea, justificando a relevância da pesquisa e estabelecendo os objetivos e metodologia do estudo. O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica sobre as tecnologias *LoRaWAN* e *Edge Computing*, contextualizando suas características técnicas e aplicações em ambientes industriais desafiadores. O Capítulo 3 examina os desafios operacionais específicos da mineração subterrânea e estabelece os requisitos tecnológicos para sistemas seguros, resilientes e ecoeficientes.

O Capítulo 4 conduz a análise comparativa entre diferentes tecnologias de comunicação e paradigmas computacionais, investigando as sinergias entre *LoRaWAN* e *Edge Computing*. O Capítulo 5 apresenta a análise de estudos de caso representativos, avaliando implementações práticas e identificando padrões de sucesso e limitações. O Capítulo 6 sintetiza os resultados da pesquisa, discutindo as implicações técnicas, os desafios de implementação e propondo diretrizes conceituais para aplicação dos sistemas híbridos investigados.

Esta pesquisa visa contribuir para o avanço do conhecimento científico sobre a aplicação de sistemas híbridos *IoT* em mineração subterrânea, oferecendo uma análise técnica fundamentada que auxilie na tomada de decisão sobre adoção de tecnologias emergentes no setor mineral. Os resultados esperados incluem a identificação de requisitos técnicos específicos, a caracterização das sinergias entre as tecnologias estudadas e a proposição de diretrizes conceituais que possam orientar

futuras implementações práticas, contribuindo para o aprimoramento da segurança operacional, sustentabilidade ambiental e eficiência produtiva em operações de mineração subterrânea.

CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Tecnologia LoRaWAN

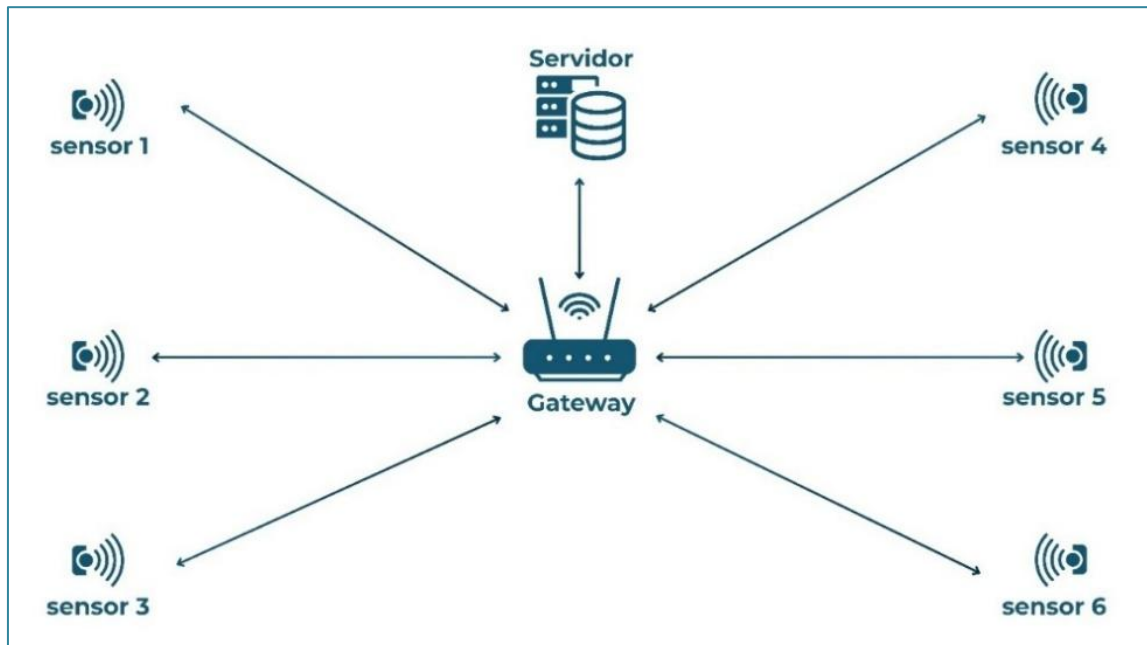
A tecnologia *Long Range Wide Area Network* (LoRaWAN) emergiu como uma solução promissora para comunicações de baixa potência e longo alcance em aplicações de Internet das Coisas (*IoT*). Baseada na modulação *Long Range* (LoRa), que utiliza a técnica *Chirp Spread Spectrum* (CSS), esta tecnologia representa uma das principais *Low Power Wide Area Networks* (LPWA) que têm atraído considerável atenção devido à sua capacidade de oferecer conectividade acessível a dispositivos de baixa potência distribuídos em áreas geográficas extensas (RAZA; KULKARNI; SOORIYABANDARA, 2017).

A técnica CSS fundamenta-se no uso de sinais *chirp*, onde a frequência varia linearmente ao longo do tempo dentro de uma banda específica. Esta modulação por espalhamento espectral distribui a energia do sinal através de uma ampla faixa de frequências, conferindo robustez excepcional contra interferências eletromagnéticas. O termo *chirp* deriva da semelhança com sons produzidos por pássaros, caracterizados pela variação contínua de frequência.

Na implementação LoRa, cada símbolo de dados é codificado como um *chirp* (sinal senoidal com amplitude constante e frequência crescente ou decrescente que varre uma largura de banda predefinida) que percorre toda a largura de banda disponível durante o período de transmissão. A informação digital é representada pela posição inicial da frequência dentro da banda, permitindo decodificação robusta mesmo quando o sinal está significativamente abaixo do nível de ruído. Esta característica torna o CSS particularmente adequado para ambientes industriais hostis, onde interferências de equipamentos pesados são constantes (KUMAR; PAUL; ANANDA, 2023).

O protocolo LoRaWAN define uma arquitetura de rede em estrela onde todos os dispositivos finais (*end devices*) comunicam-se diretamente com um ou mais *gateways* centrais, sem necessidade de roteamento intermediário entre dispositivos. Nesta topologia, cada dispositivo sensor estabelece comunicação bidirecional exclusivamente com o *gateway*, que atua como ponto de concentração e retransmissão de dados (Figura 2).

Figura 2 - Arquitetura de Rede em Estrela LoRaWAN para Mineração Subterrânea



Fonte: Adaptado de *LoRaWAN Specification* (2020)

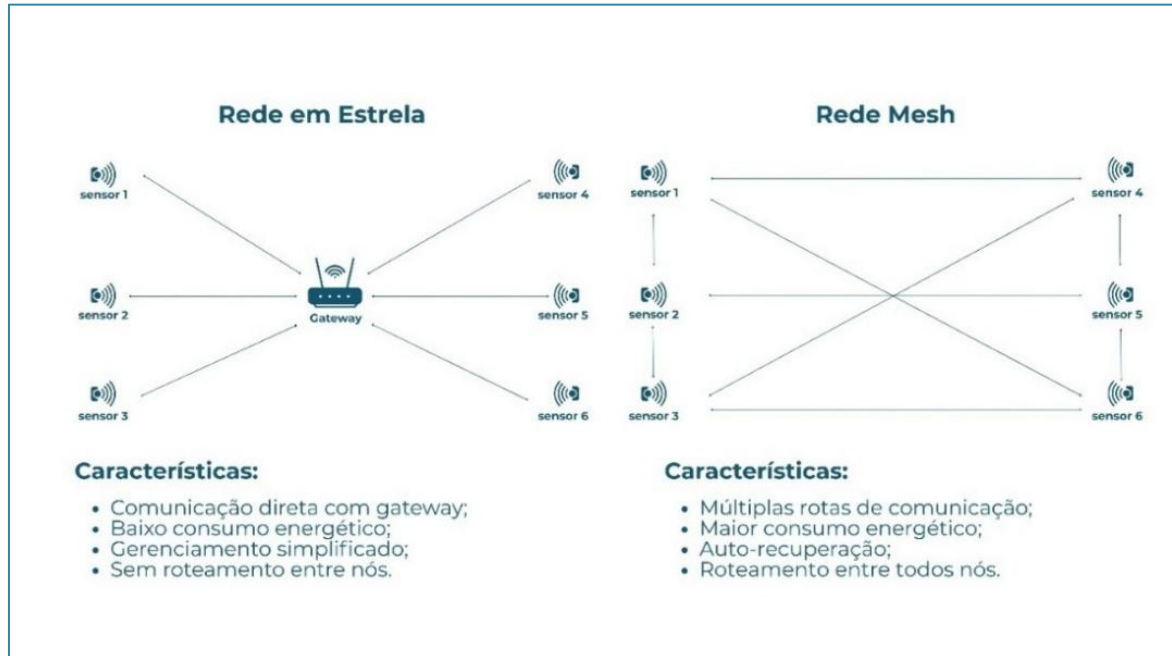
Os *gateways* funcionam como pontes de comunicação (*bridges*) que recebem mensagens dos dispositivos finais via radiofrequência *LoRa* e as encaminham para servidores de rede através de conexões IP convencionais (*Ethernet*, Wi-Fi, 3G/4G). Estes equipamentos operam de forma transparente, não processando nem interpretando o conteúdo das mensagens, mas apenas realizando a conversão entre os protocolos de comunicação das diferentes camadas da rede (*LoRaWAN SPECIFICATION*, 2020).

Esta arquitetura de *gateway* como ponte transparente oferece vantagens operacionais significativas em ambientes de mineração, uma vez que centraliza a complexidade de processamento nos servidores de rede externos, mantendo os equipamentos subterrâneos com funcionalidades simplificadas e maior confiabilidade operacional. Kumar, Paul e Ananda (2023) demonstraram que esta abordagem permite que o sistema continue operando localmente mesmo quando a conectividade com servidores remotos é interrompida, característica essencial para manter funcionalidades críticas de segurança em ambientes onde falhas de comunicação podem comprometer a integridade operacional.

Diferentemente das redes *mesh* — topologia onde cada nó atua simultaneamente como dispositivo final e roteador intermediário, retransmitindo dados de outros nós para criar uma malha interconectada de comunicação — a arquitetura

em estrela do *LoRaWAN* elimina o consumo energético adicional das múltiplas retransmissões e simplifica significativamente o gerenciamento da rede (Figura 3).

Figura 3 - Comparação entre Arquitetura em Estrela (*LoRaWAN*) e Rede *Mesh*

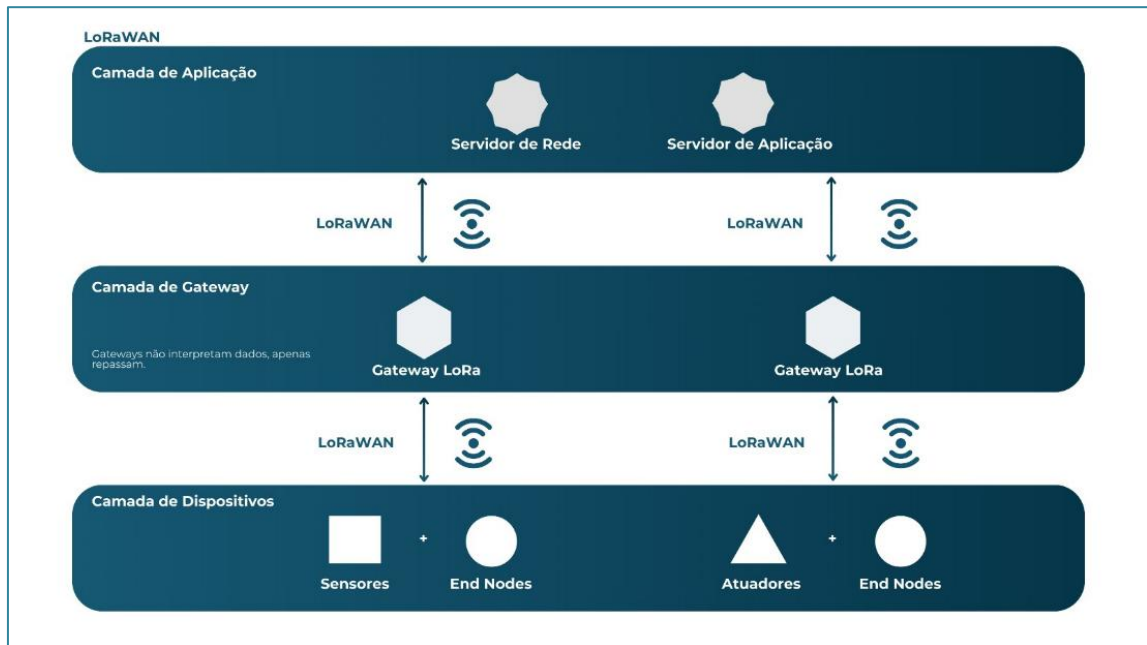


Fonte: Adaptado de Villarim (2023)

Nas redes *mesh*, cada dispositivo deve manter capacidades de roteamento ativas, monitorando continuamente o tráfego da rede e retransmitindo pacotes de outros dispositivos quando necessário. Esta funcionalidade, embora proporcione redundância e auto-recuperação, demanda consumo energético constante e processamento adicional em cada nó. Além disso, a complexidade de gerenciamento cresce exponencialmente com o número de dispositivos, uma vez que cada adição ou remoção de nó pode afetar as rotas de comunicação de toda a rede (RAZA; KULKARNI; SOORIYABANDARA, 2017).

Em contraste, a arquitetura simplificada em estrela do *LoRaWAN* representa vantagem significativa para aplicações em mineração subterrânea, reduzindo a complexidade de implementação e manutenção. A comunicação direta entre sensores e *gateways* elimina pontos únicos de falha intermediários e permite que dispositivos operem com autonomia energética estendida, característica fundamental em ambientes de difícil acesso para manutenção (Figura 4) (KUMAR; PAUL; ANANDA, 2023).

Figura 4 - Arquitetura Técnica do Protocolo *LoRaWAN* para Mineração Subterrânea



Fonte: Adaptado de Lavric e Popa (2017)

A tecnologia *LoRaWAN* apresenta características distintivas que a tornam particularmente adequada para aplicações em ambientes desafiadores. A modulação CSS proporciona robustez contra interferências e capacidade de comunicação em condições adversas de propagação. As frequências sub-GHz utilizadas (433 MHz, 868 MHz, 915 MHz, dependendo da região) oferecem melhor penetração em estruturas e maior alcance comparado a tecnologias de frequências mais altas.

As frequências sub-GHz (433 MHz, 868 MHz, 915 MHz) apresentam melhor penetração em estruturas subterrâneas devido a princípios físicos fundamentais da propagação eletromagnética. Frequências menores possuem comprimentos de onda maiores, que sofrem menor atenuação ao atravessar materiais densos como rocha e solo. Adicionalmente, as perdas por absorção dielétrica são proporcionalmente menores em frequências baixas, e a difração - capacidade da onda contornar obstáculos - é mais eficiente em comprimentos de onda maiores, características fundamentais para comunicação confiável em ambientes geologicamente complexos.

A sensibilidade de recepção excepcional, alcançando valores de até -150 dBm, permite comunicação confiável mesmo com sinais de baixa potência (MUSONDA *et al.*, 2024). As frequências sub-GHz utilizadas oferecem melhor penetração em estruturas e maior alcance comparado a tecnologias de frequências mais altas (Tabela 1).

Tabela 1 - Frequências LoRaWAN por Região e Aplicação Documentada

Região/País	Frequência Principal	Banda ISM	Potência Máxima	Aplicação Documentada	Referência
Índia	433 MHz	433.05-434.79 MHz	10 dBm	Minas de carvão subterrâneas (Kumar <i>et al.</i> , 2023)	Kumar, Paul e Ananda (2023)
Brasil	915 MHz	902-928 MHz	20 dBm	Regulamentado pela ANATEL para <i>IoT</i>	ANATEL Resolução 680/2017
Colômbia	915 MHz	902-928 MHz	-	Otimização de implementação em minas	Medina <i>et al.</i> (2024)
Europa	868 MHz	863-870 MHz	14 dBm	Aplicações industriais gerais	Regulamento ETSI
Estados Unidos	915 MHz	902-928 MHz	30 dBm	Aplicações industriais e <i>IoT</i>	FCC Part 15
Austrália	915 MHz	915-928 MHz	30 dBm	Aplicações gerais de <i>IoT</i>	ACMA

Fonte: Adaptado de Kumar, Paul e Ananda (2023)

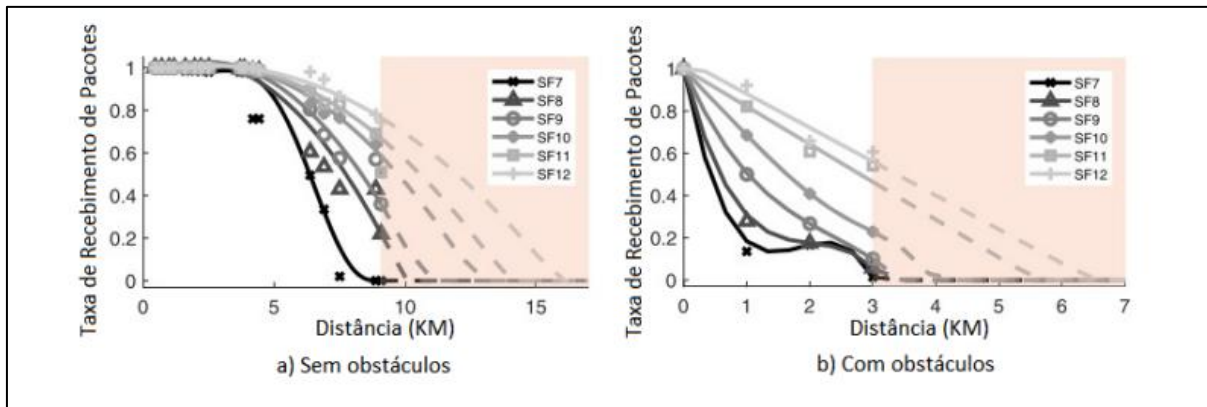
A configuração de parâmetros *LoRaWAN* representa aspecto crítico para otimização de desempenho. O *Spreading Factor* (SF) é um parâmetro fundamental da modulação *LoRa* que define quantos pulsos de sinal (denominados tecnicamente *chips*) são utilizados para representar cada unidade de informação transmitida (RAZA; KULKARNI; SOORIYABANDARA, 2017).

O SF pode ser configurado entre 7 e 12, onde cada incremento duplica o número de *chips* utilizados: SF7 emprega 128 *chips* por unidade de informação (2^7) enquanto SF12 utiliza 4.096 *chips* para a mesma quantidade de dados (2^{12}) (LORAWAN SPECIFICATION, 2020). Esta progressão exponencial estabelece um compromisso fundamental entre taxa de transmissão e alcance de comunicação.

Valores menores de SF (SF7-SF9) proporcionam maiores taxas de transmissão de dados, mas apresentam menor alcance de comunicação. Em contrapartida, valores maiores (SF10-SF12) reduzem drasticamente a taxa de dados, porém aumentam significativamente o alcance e a robustez contra interferências eletromagnéticas (KUMAR; PAUL; ANANDA, 2023).

A validação experimental destes conceitos técnicos demonstra claramente o comportamento do *Spreading Factor* em condições reais de operação, conforme evidenciado em testes conduzidos por Liando *et al.* (2019) (Figura 5).

Figura 5 - Desempenho de comunicação LoRaWAN por *Spreading Factor* em ambientes com e sem obstáculos



Fonte: Liando *et al.* (2019).

Kumar, Paul e Ananda (2023) demonstraram experimentalmente esta relação em ambientes de mineração subterrânea, onde a seleção apropriada do SF permitiu otimizar a comunicação considerando as restrições de propagação e interferência características destes ambientes. Em aplicações críticas de segurança, valores intermediários a altos de SF (SF9-SF11) frequentemente representam o equilíbrio adequado entre confiabilidade de transmissão e capacidade de resposta do sistema (MUSONDA *et al.*, 2024).

Observa-se que ao migrar de SF7 para SF12, a taxa de dados cai de 5,47 kbps para apenas 0,29 kbps — uma redução de aproximadamente 95%. Em contrapartida, o alcance aumenta significativamente, podendo ultrapassar 15 km em condições ideais com SF12, comparado a cerca de 2 km com SF7. Cada incremento no SF duplica o tempo no ar (tempo de transmissão) para o mesmo volume de dados, impactando diretamente o consumo energético dos dispositivos.

Em ambientes de mineração subterrânea, onde a confiabilidade da comunicação é prioritária sobre a velocidade de transmissão, valores intermediários a altos de SF (SF9-SF11) são frequentemente preferidos. Estes proporcionam equilíbrio adequado entre robustez do sinal — essencial para penetração em estruturas rochosas — e capacidade suficiente para transmissão de dados críticos de segurança em tempo hábil (KUMAR; PAUL; ANANDA, 2023).

O mecanismo *Adaptive Data Rate* (ADR) representa uma funcionalidade fundamental do protocolo LoRaWAN que otimiza automaticamente os parâmetros de transmissão dos dispositivos finais com base nas condições de comunicação observadas (LORAWAN SPECIFICATION, 2020). O ADR opera através do ajuste

dinâmico de três parâmetros principais: o *Spreading Factor* (SF), a largura de banda e a potência de transmissão, visando maximizar a eficiência energética mantendo a confiabilidade da comunicação.

O funcionamento do ADR baseia-se na análise contínua da qualidade do sinal recebido pelo *gateway*, medida através do indicador RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) e da relação sinal-ruído (SNR). Quando as condições de comunicação são favoráveis, indicadas por valores altos de RSSI e SNR, o algoritmo ADR reduz progressivamente o SF e a potência de transmissão, permitindo taxas de dados mais elevadas e menor consumo energético (RAZA; KULKARNI; SOORIYABANDARA, 2017).

Em contra partida, quando a qualidade do *link* deteriora-se, evidenciada por sinais fracos ou alta taxa de perda de pacotes, o mecanismo incrementa automaticamente o SF e a potência, priorizando a confiabilidade da comunicação sobre a eficiência energética. Esta adaptação ocorre de forma transparente ao dispositivo final, sendo coordenada pelo servidor de rede através de comandos MAC (*Medium Access Control*) enviados nas janelas de recepção programadas (LORAWAN SPECIFICATION, 2020). Entretanto, o mecanismo ADR tradicional apresenta limitações significativas em ambientes dinâmicos.

Zhao *et al.* (2023) desenvolveram algoritmos avançados de otimização baseados em aprendizado de máquina para superar essas limitações, demonstrando melhorias substanciais na eficiência energética de redes *LoRaWAN* em ambientes complexos. Esta evolução evidencia a necessidade contínua de aprimoramento dos mecanismos de gerenciamento de recursos.

As redes de sensores subterrâneos sem fio (WUSNs) baseadas em *LoRaWAN* têm sido crescentemente investigadas no contexto do paradigma emergente da *Internet of Underground Things* (IoUT). Este paradigma está abrindo caminho para soluções inovadoras de medição, amostragem e transmissão de fenômenos subterrâneos, cujo conhecimento é necessário para diversas operações tanto subterrâneas quanto de superfície (DI RENZONE *et al.*, 2021).

Kumar, Paul e Ananda (2023) demonstraram a viabilidade prática da tecnologia para transmissão efetiva de dados em ambientes de mineração, confirmando que o uso de bandas de frequência não licenciadas oferece flexibilidade de implementação essencial para contextos operacionais diversos.

Apesar das vantagens significativas, a tecnologia *LoRaWAN* apresenta

limitações importantes que devem ser consideradas durante o planejamento de sistemas. As taxas de dados limitadas, tipicamente entre 0,3 e 50 kbps, restringem aplicações que requerem transmissão de grandes volumes de dados. A latência variável pode afetar aplicações críticas em tempo real, e a capacidade de rede é limitada pelo ciclo de trabalho regulamentado (porcentagem máxima de tempo que um dispositivo pode transmitir, tipicamente 1% na Europa) e pelas colisões de pacotes (MUSONDA *et al.*, 2024).

Di Renzone *et al.* (2021) enfatizam que o desempenho de transmissões subterrâneas varia significativamente com fatores ambientais, incluindo composição do meio, umidade e estrutura geológica. Estas variações devem ser consideradas durante o planejamento de implementação para garantir cobertura e confiabilidade adequadas.

O estudo de Di Renzone *et al.* (2021) investigou o desempenho de transmissões *LoRaWAN* do subsolo para a superfície (UG2AG - *Underground to Aboveground*) em três tipos de solo com composições praticamente puras: cascalho com 86% de fração grossa, areia com 95% de fração média e argila com 90% de fração fina, coletados na região de Siena, Itália. Os testes foram realizados em profundidades de 10 a 50 cm, com *gateway* posicionado a 15 metros do ponto de enterramento, utilizando frequência de 867,8 MHz e todos os *spreading factors* (SF 7-12) (Tabela 2).

Tabela 2 - Composição e Propriedades dos Solos Testados

Tipo de Solo	Profundidade	RSSI Médio (dBm)	SNR Médio (dB)	Taxa Perda Pacotes (%)
Areia	10-50 cm	-69.9 a -82.4	9.6 a 10.1	0-0.3
Cascalho	10-50 cm	-79.4 a -94.7	0.3 a 11.6	0-1.6
Argila	10-50 cm	-71.5 a -94.4	2.2 a 11.3	0-6.6

Fonte: Adaptada Di Renzone *et al.* (2021)

Os resultados demonstram que transmissões de dados bem-sucedidas do subsolo em profundidades de até 50 cm podem ser alcançadas para cada composição de solo. O solo tipo cascalho fornece o pior desempenho em termos de RSSI e SNR, enquanto os melhores resultados são fornecidos pelo solo tipo areia. A diferença entre tipos de solo é geralmente em torno de 10 *dBm*. Para a configuração experimental (*gateway* a 15m, frequência 867,8 MHz), a taxa de perda de pacotes foi quase sempre

abaixo de 2%, exceto para o solo tipo argila em SF=12 para profundidades de 40 cm (3,3%) e 50 cm (6,6%).

Estas variações demonstram claramente a necessidade de caracterização específica do ambiente antes da implementação de sistemas híbridos *LoRaWAN* - *Edge Computing* em mineração subterrânea, confirmando que o desempenho das transmissões é significativamente influenciado pelas propriedades físicas e composição do meio.

Entre as várias tecnologias LPWA disponíveis, incluindo *LoRa*, *Sigfox* e *Narrowband-IoT* (NB-IoT), a *LoRa* demonstra vantagens em segurança, comprimento de pacotes e flexibilidade de implementação, características que a posicionam favoravelmente para aplicações de monitoramento industrial (ZHAO *et al.*, 2023). A análise comparativa das principais tecnologias LPWA para mineração subterrânea revela diferenças significativas em termos de capacidades técnicas, adequação operacional e viabilidade econômica (Tabela 3).

Tabela 3 - Comparação de Tecnologias LPWA para Aplicações em Mineração Subterrânea

Parâmetro	LoRaWAN	Sigfox	NB-IoT	LTE-M
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS				
Frequência	433 MHz, 868 MHz (Europa), 915 MHz (América do Norte)	868 MHz (Europa), 915 MHz (EUA)	Banda licenciada LTE (700-2100 MHz)	Banda licenciada LTE (700-2100 MHz)
Taxa de Dados	0,3-50 kbps	100-600 bps (uplink) 600 bps (downlink)	200 kbps (uplink) 250 kbps (downlink)	1 Mbps (uplink/downlink)
Alcance	Até 5 km (urbano) 15 km (rural)	10-40 km (rural) 3-10 km (urbano)	1-10 km	5-10 km
Sensibilidade	-150 dBm	-142 dBm	-130 dBm	-130 dBm
Tamanho do Pacote	243 bytes	12 bytes (uplink) 8 bytes (downlink)	1600 bytes	Sem limitação específica
ADEQUAÇÃO PARA MINERAÇÃO				
Autonomia da Bateria	Até 10 anos	8-12 anos	2-5 anos	1-3 anos
Resistência a Interferências	Alta (<i>chirp spread spectrum</i>)	Moderada	Baixa (<i>banda licenciada</i>)	Baixa (<i>banda licenciada</i>)
Penetração Subterrânea	Excelente (<i>frequências sub-GHz</i>)	Boa	Limitada (<i>frequências altas</i>)	Limitada (<i>frequências altas</i>)
Flexibilidade de Implementação	Alta (<i>rede privada ou pública</i>)	Baixa (<i>dependente de operadora</i>)	Baixa (<i>dependente de operadora</i>)	Baixa (<i>dependente de operadora</i>)
ASPECTOS OPERACIONAIS				
Custo de Implementação	Baixo (<i>banda não licenciada</i>)	Médio (<i>taxa de</i>)	Alto (<i>infraestrutura</i>)	Alto (<i>infraestrutura</i>)

		<i>operadora)</i>	<i>celular)</i>	<i>celular)</i>
Latência	80-500 ms	1-30 segundos	1,6-10 segundos	10-15 ms
Capacidade de Rede	Milhões de nós (<i>com ADR</i>)	140 mensagens/dia <i>por dispositivo</i>	Alta capacidade	Alta capacidade
Segurança	AES 128-bit <i>dados criptografados</i>	Básica	Padrão celular	Padrão celular
LIMITAÇÕES				
Principal Restrição	Protocolo MAC Aloha <i>pode causar colisões</i>	Limitação severa <i>de dados</i>	Dependência de <i>infraestrutura</i>	Alto consumo <i>energético</i>
Disponibilidade	Global (<i>banda não licenciada</i>)	Limitada <i>geograficamente</i>	Dependente de <i>cobertura</i>	Dependente de <i>cobertura</i>
ADEQUAÇÃO PARA MINERAÇÃO SUBTERRÂNEA				
Classificação Geral	ALTA	MÉDIA	BAIXA	BAIXA

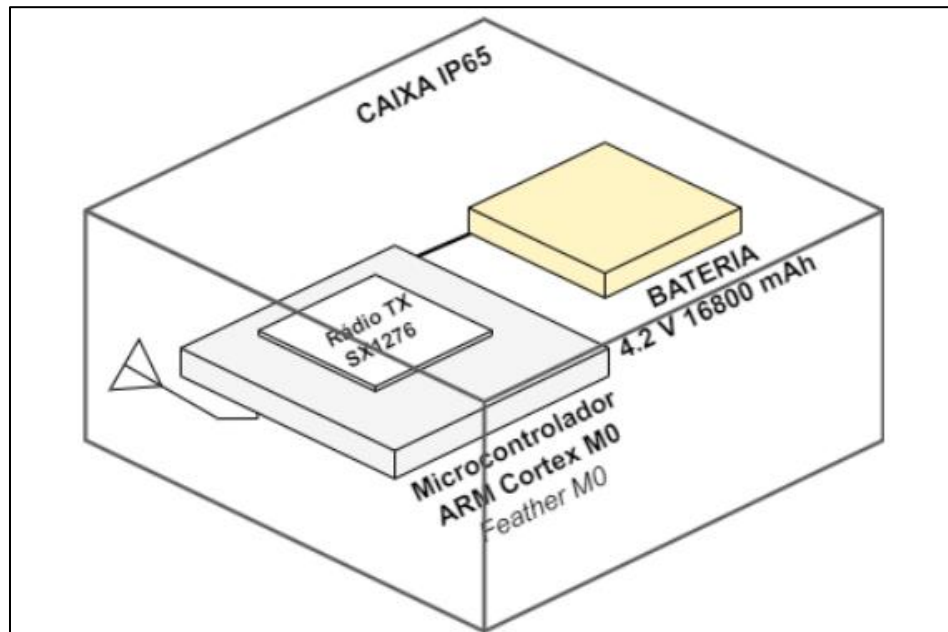
Fonte: Adaptado de Musonda *et al.* (2024)

O desenvolvimento contínuo de técnicas de otimização, protocolos aprimorados e integração com outras tecnologias está expandindo as capacidades e aplicabilidade do *LoRaWAN*. Santos *et al.* (2022) demonstraram que implementações práticas com custo acessível podem alcançar desempenho comparável a sistemas convencionais mais custosos, evidenciando o potencial democratizador desta tecnologia para aplicações de segurança industrial.

A implementação prática de sistemas *LoRaWAN* demanda integração cuidadosa de componentes específicos que garantam operação confiável em ambientes hostis. A validação experimental através de protótipos funcionais constitui etapa fundamental para comprovar a viabilidade técnica dos sistemas propostos.

A validação experimental de sistemas *LoRa* em ambientes subterrâneos demanda desenvolvimento de protótipos específicos que comprovem a viabilidade técnica da tecnologia. Villarim (2023) desenvolveu um protótipo funcional utilizando microcontrolador ARM Cortex M0 e módulo de rádio SX1276, alimentado por bateria de 3,2V 16800 mAh, para avaliação do desempenho de transmissão *LoRa* em sistemas de distribuição subterrânea de água (Figura 6).

Figura 6 - Protótipo desenvolvido para testes de transmissão via *LoRa* em ambiente subterrâneo



Fonte: Villarim (2023).

A evolução da tecnologia *LoRaWAN* continua direcionada para superar suas limitações atuais mantendo as características fundamentais de baixo consumo e longo alcance que a tornam única no ecossistema de tecnologias *IoT*. Esta trajetória de desenvolvimento posiciona o *LoRaWAN* como componente fundamental para sistemas de monitoramento em ambientes industriais complexos.

2.2 Edge Computing

Edge Computing representa um paradigma computacional distribuído que aproxima o processamento de dados dos locais onde são gerados, emergindo como resposta às limitações da computação em nuvem tradicional em cenários que demandam baixa latência, alta confiabilidade e operação em ambientes com conectividade limitada (SITTÓN-CANDANEDO *et al.*, 2020).

O paradigma *Edge Computing* fundamenta-se na descentralização do processamento, distribuindo capacidades computacionais ao longo da infraestrutura de rede. Esta abordagem contrasta com modelos centralizados tradicionais, onde todo processamento ocorre em *datacenters* remotos. A proximidade física entre processamento e fonte de dados resulta em redução significativa de latência, menor consumo de largura de banda e maior autonomia operacional dos sistemas (FANG *et al.*, 2019).

Para aplicações industriais críticas, o *Edge Computing* viabiliza processamento em tempo real de dados heterogêneos, superando limitações de algoritmos tradicionais que requerem homogeneidade de dados ou capacidades computacionais que excedem as disponíveis em dispositivos *IoT* com restrições energéticas (LIU *et al.*, 2021).

Sittón-Candanedo *et al.* (2020) identificaram três principais arquiteturas de referência para *Edge Computing* na Indústria 4.0, cujas características comparativas são apresentadas (Tabela 4).

Tabela 4 - Comparação das principais arquiteturas de referência para *Edge Computing* na Indústria 4.0

Característica	FAR-Edge	Edge Computing Consortium 2.0	Industrial Internet Consortium (IIC)
Origem/Desenvolvimento	Projeto H2020 (União Europeia)	Consórcio industrial baseado em padrão ISO/IEC/IEEE 42010:2011	Consórcio global de indústrias
Estrutura	3 camadas integradas com DLT	Modelo em camadas com interfaces abertas	3 camadas principais
Foco Principal	Integração com tecnologias de registro distribuído (<i>blockchain</i>)	Interoperabilidade entre sistemas e fabricantes	Confiabilidade e segurança em ambientes industriais
Camadas	1. Dispositivos de campo 2. <i>Edge</i> /Fog 3. <i>Cloud</i>	1. Dispositivos 2. <i>Edge</i> 3. Plataforma 4. Aplicação	1. Coleta de dados 2. Processamento 3. Aplicação
Diferencial	Uso de <i>Distributed Ledger Technologies</i> para garantir integridade e rastreabilidade	Interfaces padronizadas e abertas para máxima compatibilidade	Ênfase em requisitos industriais críticos
Aplicabilidade para Mineração	Alta - rastreabilidade de dados críticos de segurança	Média - facilita integração de equipamentos diversos	Muito Alta - projetada para ambientes industriais hosts
Complexidade de Implementação	Alta (requer infraestrutura DLT)	Média (depende da padronização)	Média-Alta (foco em robustez)
Escalabilidade	Moderada (limitada por DLT)	Alta (interfaces padronizadas)	Alta (<i>design</i> industrial)

Fonte: Adaptado de Sittón-Candanedo *et al.* (2020)

A arquitetura FAR-Edge, desenvolvida pelo projeto H2020, destaca-se pela integração com *Distributed Ledger Technologies* (DLT), proporcionando rastreabilidade essencial para dados críticos de segurança. O *Edge Computing Consortium 2.0* prioriza interoperabilidade através de interfaces abertas baseadas no padrão ISO/IEC/IEEE 42010:2011, facilitando integração entre equipamentos de

diferentes fabricantes. Por fim, o *Industrial Internet Consortium* (IIC) foca especificamente em requisitos de ambientes industriais hostis, com ênfase em confiabilidade e segurança operacional.

Para aplicações em mineração subterrânea, a arquitetura IIC apresenta maior adequação devido ao seu *design* orientado para ambientes industriais críticos, embora elementos da *FAR-Edge*, como rastreabilidade via DLT, possam ser incorporados para garantir integridade de dados de segurança (SITTÓN-CANDANEDO *et al.*, 2020).

As arquiteturas *Edge* oferecem múltiplos benefícios operacionais. O processamento próximo à fonte permite filtragem imediata de dados de baixo valor, reduzindo significativamente os requisitos de transmissão e armazenamento. A capacidade de resposta autônoma local garante continuidade operacional mesmo durante interrupções de conectividade com sistemas centralizados. Adicionalmente, o processamento descentralizado melhora a escalabilidade sistêmica e proporciona isolamento natural entre diferentes domínios operacionais, característica importante para aplicações industriais com requisitos de privacidade e segurança (SITTÓN-CANDANEDO *et al.*, 2020).

Em contextos de mineração subterrânea, o *Edge Computing* demonstra particular relevância devido às características únicas destes ambientes. A capacidade de processar localmente dados de múltiplos sensores permite detecção imediata de condições anormais e acionamento autônomo de protocolos de segurança. Sistemas com processamento local podem executar algoritmos de detecção e resposta mesmo em condições de isolamento comunicacional, característica crítica para ambientes subterrâneos (CHENG *et al.*, 2021).

Cheng *et al.* (2021) desenvolveram arquiteturas específicas para sistemas inteligentes de mineração que consideram a natureza multiparamétrica e sensível a recursos computacionais destas aplicações, demonstrando a necessidade de design cuidadoso para equilibrar capacidades de processamento com restrições operacionais.

A implementação prática de *Edge Computing* em ambientes industriais apresenta desafios multidimensionais que requerem soluções equilibradas. O balanceamento entre capacidade computacional e eficiência energética constitui questão central, uma vez que dispositivos *edge* necessitam processar algoritmos complexos operando com restrições energéticas (LIU *et al.*, 2021).

Adicionalmente, a heterogeneidade característica dos ambientes industriais,

com múltiplos protocolos e formatos de dados coexistindo, demanda arquiteturas suficientemente flexíveis para integrar estas diversas fontes de informação sem comprometer o desempenho sistêmico (FANG *et al.*, 2019).

Os requisitos de confiabilidade em ambientes hostis introduzem complexidade adicional ao *design* de sistemas *edge*. A operação em condições adversas exige não apenas redundância e tolerância a falhas, mas também capacidades de auto recuperação que garantam continuidade operacional mesmo em cenários de falha parcial (CHENG *et al.*, 2021).

Entretanto, estas características de robustez devem ser implementadas considerando as restrições práticas de custo e complexidade operacional, resultando em soluções necessariamente otimizadas para cada contexto específico de aplicação (SITTÓN-CANDANEDO *et al.*, 2020).

A trajetória evolutiva do *Edge Computing* demonstra clara tendência em direção a maior autonomia e inteligência distribuída. A incorporação de técnicas de inteligência artificial e aprendizado de máquina tem expandido significativamente as capacidades analíticas dos sistemas *edge*, transformando-os de simples processadores de dados em plataformas capazes de executar análises sofisticadas e tomar decisões complexas localmente (LIU *et al.*, 2021; ZHAO *et al.*, 2023).

Paralelamente, avanços no desenvolvimento de *hardware* especializado têm progressivamente reduzido as barreiras históricas de custo e consumo energético, viabilizando aplicações anteriormente impraticáveis (FANG *et al.*, 2019).

A convergência tecnológica emergente entre *Edge Computing* e paradigmas complementares está redefinindo os limites do possível em computação distribuída. A integração com tecnologias como 5G, *blockchain* e computação quântica não representa meramente adição de funcionalidades, mas sim criação de sinergias que amplificam capacidades e criam possibilidades arquiteturais (MUSONDA *et al.*, 2024).

Esta evolução convergente posiciona definitivamente o *Edge Computing* como componente fundamental na construção da próxima geração de sistemas industriais, caracterizados por inteligência distribuída, autonomia operacional e capacidade adaptativa sem precedentes (CHENG *et al.*, 2021).

2.3 Integração LoRaWAN - Edge Computing

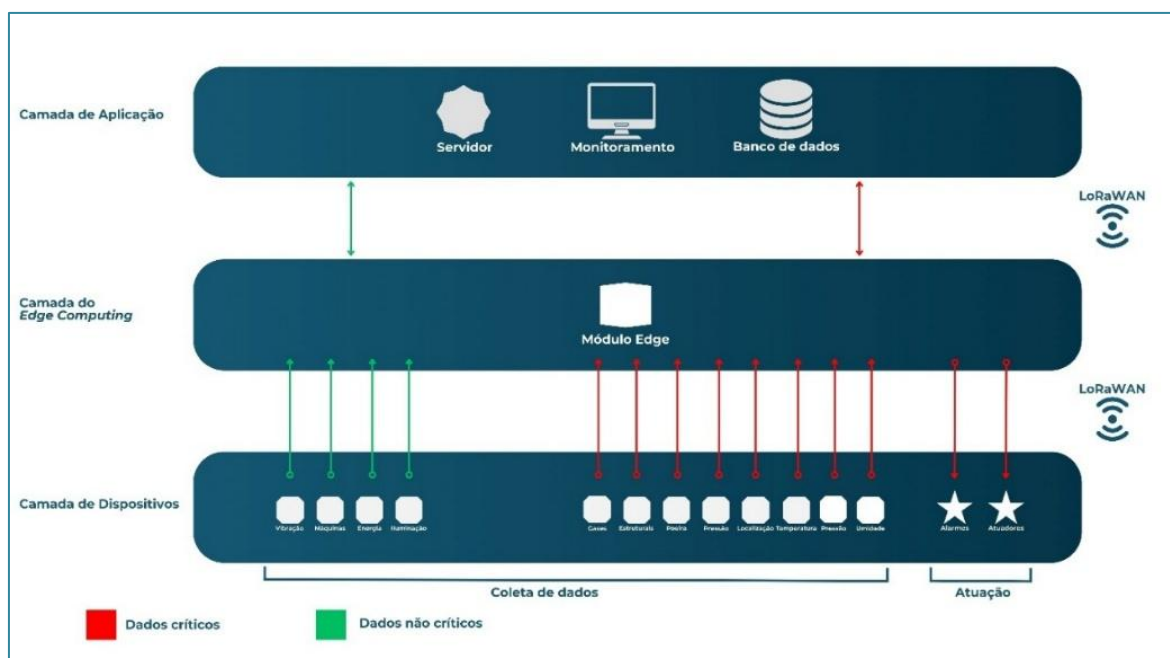
A convergência entre tecnologias *LoRaWAN* e *Edge Computing* cria sinergias que amplificam as capacidades individuais de cada tecnologia, oferecendo uma

abordagem integrada para sistemas de monitoramento em ambientes industriais complexos. Esta integração é particularmente relevante para aplicações em mineração subterrânea, onde as limitações de comunicação e processamento impõem desafios únicos que podem ser endereçados através da combinação dessas tecnologias complementares.

A arquitetura híbrida permite que sistemas *IIoT* (*Industrial Internet of Things*) combinem a capacidade de comunicação de longo alcance e baixo consumo do *LoRaWAN* com o processamento local e autônomo proporcionado pelo *Edge Computing*. Medina *et al.* (2024) propuseram metodologias específicas para implementação destes sistemas em ambientes de mineração, considerando as características estruturais complexas que afetam tanto a propagação de sinais quanto as necessidades de processamento distribuído.

A abordagem integrada permite que nós sensores coletem dados ambientais críticos, processem informações localmente para detecção imediata de anomalias, e transmitam apenas dados relevantes através da rede *LoRaWAN*, otimizando assim o uso de recursos de comunicação e energia (Figura 7).

Figura 7- Arquitetura Integrada *LoRaWAN* - *Edge Computing* em Mineração Subterrânea



Fonte: Adaptado de Medina *et al.* (2024), Kumar, Paul e Ananda (2023) e Sittón-Candanedo *et al.* (2020).

A capacidade de processamento local proporcionada pelo *Edge Computing*

transforma fundamentalmente a operação das redes *LoRaWAN*. Enquanto redes *LoRaWAN* tradicionais dependem de mecanismos relativamente simples de configuração como o *Adaptive Data Rate* (ADR), a integração com *Edge Computing* permite implementação de algoritmos sofisticados de otimização. Zhao *et al.* (2023) demonstraram que algoritmos de aprendizado de máquina executados localmente podem melhorar a eficiência energética em ordens de magnitude comparado aos mecanismos convencionais, adaptando-se dinamicamente às condições ambientais variáveis características de ambientes subterrâneos.

Esta integração facilita ainda a implementação de sistemas de resposta a emergências mais eficazes. O processamento *Edge* permite que decisões críticas sejam tomadas localmente com latência mínima, enquanto a rede *LoRaWAN* mantém a conectividade com centros de controle externos para supervisão e coordenação global. Liu *et al.* (2021) enfatizam que esta capacidade *dual* é essencial para aplicações de segurança, onde a detecção e resposta imediata a condições perigosas deve ocorrer independentemente do status de conectividade externa.

A arquitetura integrada de WUSNs (*Wireless Underground Sensor Networks*) baseados em *LoRaWAN - Edge Computing* consiste em múltiplas camadas funcionais coordenadas. Na camada de sensoriamento, dispositivos coletam informações ambientais diversas. A camada de processamento *edge* executa algoritmos de análise e detecção, filtrando e agregando dados. A camada de comunicação *LoRaWAN* transmite informações processadas para *Gateways* e sistemas centrais. Esta estrutura em camadas permite otimização independente de cada componente mantendo a coesão sistêmica.

Um aspecto fundamental desta integração é a capacidade de adaptação dinâmica às condições operacionais. O processamento *edge* pode ajustar parâmetros de transmissão *LoRaWAN* baseado em análise local de qualidade de *link*, métrica que avalia a confiabilidade da comunicação através de parâmetros como *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) e relação sinal-ruído (SNR) (KUMAR; PAUL; ANANDA, 2023), densidade de tráfego e criticidade dos dados. Simultaneamente, pode modificar seus próprios algoritmos de processamento baseado em *feedback* recebido através da rede *LoRaWAN*, criando um ciclo de otimização contínua que melhora progressivamente o desempenho do sistema.

A validação experimental desta integração tem demonstrado resultados promissores em diversos contextos operacionais. Protótipos desenvolvidos na

literatura combinam capacidades de processamento local com flexibilidade de comunicação, demonstrando que sistemas híbridos podem operar efetivamente tanto em modo autônomo quanto conectado (MEDINA *et al.*, 2024).

A implementação prática desta integração requer consideração cuidadosa de múltiplos fatores técnicos. A distribuição de processamento entre dispositivos *edge* e sistemas centrais deve ser otimizada baseada em requisitos de latência, consumo energético e criticidade das aplicações. A sincronização entre processamento local e comunicação remota deve garantir consistência de dados sem comprometer a autonomia operacional. O gerenciamento de recursos deve balancear as demandas competitivas de processamento e comunicação dentro das restrições energéticas dos dispositivos.

Fang *et al.* (2019) destacam que a combinação destas tecnologias é particularmente vital para indústrias de alto risco como mineração, onde a prevenção de acidentes depende criticamente da capacidade de detectar e responder rapidamente a condições anormais. A arquitetura integrada não apenas melhora a segurança operacional, mas também contribui para eficiência e sustentabilidade através da otimização do uso de recursos.

O desenvolvimento futuro desta integração aponta para ainda maior convergência entre as tecnologias. Avanços em *hardware* estão permitindo que dispositivos *LoRaWAN* incorporem capacidades de processamento mais poderosas, enquanto técnicas de *Edge Computing* estão sendo otimizadas para operar com as restrições características de redes LPWA. Esta evolução convergente está criando uma geração de sistemas *IoT* verdadeiramente inteligentes e autônomos, capazes de operar efetivamente nos ambientes mais desafiadores.

2.4 Desafios e Limitações

A implementação de sistemas híbridos *LoRaWAN - Edge Computing* em ambientes de mineração subterrânea apresenta desafios técnicos, ambientais e regulamentares que devem ser cuidadosamente considerados durante o processo de *design* e implementação. Estes desafios emergem tanto das características intrínsecas das tecnologias envolvidas quanto das condições únicas dos ambientes operacionais.

Os desafios técnicos fundamentais relacionam-se à natureza conflitante dos requisitos operacionais. Sistemas de mineração demandam simultaneamente alta

confiabilidade, baixo consumo energético, comunicação de longo alcance e processamento em tempo real - requisitos que frequentemente impõem compromissos técnicos complexos. Musonda *et al.* (2024) identificam que a heterogeneidade de dispositivos e protocolos, combinada com as condições ambientais, exacerba significativamente estes desafios técnicos, criando cenários onde soluções convencionais tornam-se inadequadas.

As limitações energéticas representam uma barreira crítica particularmente desafiadora. Em redes de sensores subterrâneos, onde o acesso físico para manutenção é restrito, a vida útil das baterias torna-se fator determinante para a viabilidade operacional. Zhao *et al.* (2023) observam que esta realidade impõe a necessidade de algoritmos adaptativos capazes de otimizar dinamicamente o consumo energético sem comprometer a funcionalidade essencial dos sistemas. O paradoxo entre a necessidade de processamento sofisticado e as restrições energéticas dos dispositivos *IoT* cria um espaço de *design* restrito.

A complexidade regulamentar adiciona outra dimensão de desafios. Ambientes de mineração subterrânea são governados por regulamentações rigorosas de segurança que abrangem desde certificações de equipamentos para atmosferas explosivas até conformidade com normas de comunicação e monitoramento ambiental. Medina *et al.* (2024) destacam que estas exigências regulamentares podem impor limitações significativas nas escolhas de *design*, frequentemente restringindo o uso de tecnologias ou configurações que seriam tecnicamente viáveis, mas não atendem aos requisitos normativos.

A integração sistêmica apresenta desafios próprios derivados da necessidade de coordenar múltiplos subsistemas heterogêneos. A interoperabilidade entre diferentes gerações de equipamentos, protocolos diversos e sistemas legados cria complexidade adicional que deve ser gerenciada sem comprometer a confiabilidade operacional. Cheng *et al.* (2021) observam que esta integração multiparamétrica requer não apenas soluções técnicas, mas também *frameworks* de gerenciamento, estruturas conceituais e metodológicas que estabelecem diretrizes, padrões e processos organizados, capazes de manter coerência sistêmica em ambientes dinâmicos e imprevisíveis.

Aspectos relacionados à privacidade e segurança de dados emergem como preocupações crescentes, especialmente quando sistemas incorporam monitoramento de trabalhadores. Silva, Silva e Santos (2025) identificaram através de

análise sistemática que questões sobre propriedade, análise e uso de dados coletados podem criar barreiras significativas para adoção de tecnologias, especialmente quando não há *frameworks* claros de governança de dados. A necessidade de balancear transparência operacional com privacidade individual representa desafio ético e técnico que ainda carece de soluções definitivas.

As características físicas dos ambientes subterrâneos impõem limitações fundamentais que não podem ser completamente superadas pela tecnologia atual. Di Renzone *et al.* (2021) enfatizam que as propriedades intrínsecas de atenuação e as variações imprevisíveis nas condições de propagação criam incertezas que devem ser acomodadas através de margens de *design* conservadoras, impactando negativamente a eficiência dos sistemas. Fatores como interferência eletromagnética de equipamentos pesados, variações extremas de temperatura e umidade, e a natureza dinâmica das operações de mineração criam um ambiente operacional que desafia continuamente os limites das tecnologias disponíveis.

O custo total de propriedade representa consideração crítica que vai além do investimento inicial. A necessidade de manutenção especializada, atualizações regulares para conformidade normativa, e a eventual obsolescência tecnológica devem ser consideradas no planejamento de longo prazo. A relação custo-benefício deve ser avaliada não apenas em termos econômicos diretos, mas também considerando impactos na segurança, conformidade regulatória e sustentabilidade operacional.

Apesar destes desafios substanciais, as pesquisas analisadas convergem na conclusão de que a integração *LoRaWAN - Edge Computing* oferece uma trajetória viável e promissora para evolução dos sistemas de monitoramento em mineração subterrânea. O desenvolvimento contínuo de tecnologias, metodologias de otimização e *frameworks* de implementação está progressivamente endereçando estas limitações. A chave para o sucesso reside no reconhecimento explícito destes desafios durante o design e na adoção de abordagens que acomodem as limitações atuais enquanto mantêm flexibilidade para incorporar futuros avanços tecnológicos.

CAPÍTULO 3 - DESAFIOS E REQUISITOS TECNOLÓGICOS EM MINERAÇÃO SUBTERRÂNEA

A implementação de sistemas híbridos *LoRaWAN - Edge Computing* em operações de mineração subterrânea demanda o atendimento a requisitos específicos que emergem tanto das condições operacionais únicas destes ambientes quanto das exigências regulatórias aplicáveis. Diferentemente de aplicações industriais convencionais, o contexto subterrâneo impõe restrições que definem os parâmetros mínimos aceitáveis para garantir segurança operacional e conformidade normativa.

3.1 Requisitos Operacionais e Normativos

As operações de mineração subterrânea no Brasil são regulamentadas pela Norma Regulamentadora NR-22, que estabelece requisitos de segurança e saúde ocupacional. A NR-22 determina que todas as galerias de desenvolvimento, após 10 m (dez metros) de avanço, e obras subterrâneas sem comunicação ou em fundo-de-saco (galerias com apenas uma saída, sem comunicação direta com outras vias de acesso) devem ser ventiladas por meio de sistema de ventilação auxiliar (BRASIL, 2024).

A implementação efetiva de sistemas híbridos *LoRaWAN - Edge Computing* em mineração subterrânea requer classificação sistemática dos parâmetros de monitoramento quanto à criticidade operacional e tempo de resposta necessário. Esta classificação orienta a arquitetura do sistema de processamento distribuído, determinando quais variáveis demandam processamento local imediato através de *Edge Computing* e quais podem ser transmitidas via *LoRaWAN* para análise centralizada. A categorização entre parâmetros críticos e não críticos fundamenta-se nos requisitos normativos da NR-22, limites de tolerância da NR-15 e características operacionais específicas do ambiente subterrâneo (Tabela 5).

Tabela 5 - Classificação de Parâmetros Críticos e Não Críticos para Monitoramento em Mineração Subterrânea

Parâmetro	Limite Crítico	Base Normativa	Classificação	Ação Requerida	Tempo de Resposta
PARÂMETROS CRÍTICOS (SUBTERRÂNEO)					
Concentração de Oxigênio (O ₂)	< 19% em volume	NR-22 (22.22.9)	CRÍTICO	Evacuação imediata	< 30 segundos
Metano (CH ₄)	> 1,0% em	NR-22	CRÍTICO	Suspensão	< 30

	volume	(22.26.2)		atividades	segundos
Metano - Nível Proibitivo	≥ 2,0% em volume	NR-22 (22.26.2.2)	CRÍTICO	Proibição de acesso	< 30 segundos
Monóxido de Carbono (CO)	> 39 ppm	NR-15 Anexo 11	CRÍTICO	Alerta máximo	< 30 segundos
Gás Sulfídrico (H₂S)	> 8 ppm	NR-15 Anexo 11	CRÍTICO	Alerta máximo	< 30 segundos
Falha Ventilação Principal	Parada > 30 min	NR-22 (22.22.23)	CRÍTICO	Evacuação preventiva	< 2 minutos
Deteção de Atmosferas Explosivas	Presença detectada	NR-22 (22.26.1)	CRÍTICO	Evacuação imediata	< 100 ms
Falta Energia Ventilação	Interrupção sistema	NR-22 (22.22.3.1)	CRÍTICO	Retirada imediata	< 5 minutos
Bloqueio Sistema Comunicação	Perda total	NR-22 (22.16.3)	CRÍTICO	Paralisação transporte	< 2 minutos
Velocidade Ar Inadequada	< 0,2 m/s ou > 8 m/s	NR-22 (22.22.18)	CRÍTICO	Correção ventilação	< 5 minutos
Instabilidade Maciço	Sinais detectados	NR-22 (22.13.3.1)	CRÍTICO	Evacuação área risco	< 1 minuto
Temperatura Extrema	> 35°C (bulbo úmido)	NR-22 (22.22.2)	CRÍTICO	Redução atividades	< 5 minutos
PARÂMETROS NÃO CRÍTICOS (SUBTERRÂNEO)					
Umidade Relativa	Fora faixa conforto	NR-17	NÃO CRÍTICO	Ajuste climatização	< 30 minutos
Ruído Ocupacional	> 85 dB(A)	NR-15 Anexo 1	NÃO CRÍTICO	Proteção auditiva	< 1 hora
Poeiras Minerais	Acima limite tolerância	NR-22 (22.15.3)	NÃO CRÍTICO	Medidas controle	< 2 horas
Iluminação Deficiente	< níveis mínimos NR-22	NR-22 (22.25.1.1)	NÃO CRÍTICO	Correção iluminação	< 1 hora
Vibração Equipamentos	Níveis elevados	NR-15 Anexo 8	NÃO CRÍTICO	Manutenção preventiva	< 4 horas
Pressão Atmosférica	Variações normais	Literatura técnica	NÃO CRÍTICO	Monitoramento	< 2 horas
PARÂMETROS OPERACIONAIS					
Falha Equipamento Individual	Defeito detectado	NR-22 (geral)	OPERACIONAL	Reparo/substituição	< 30 minutos
Desvio Processo Produtivo	Fora especificação	Procedimentos internos	OPERACIONAL	Ajuste operacional	< 1 hora
Consumo Energético	Acima planejado	Gestão energética	OPERACIONAL	Otimização	< 4 horas
Localização Pessoal	Perda rastreamento	NR-22 (22.30.1.j)	OPERACIONAL	Busca e localização	< 10 minutos

Fonte: Adaptado de Brasil (2024) e Kumar, Paul e Ananda (2023).

A categorização apresentada estabelece *framework* operacional para implementação de sistemas híbridos que equilibra segurança e eficiência operacional. Parâmetros críticos, caracterizados por tempo de resposta inferior a cinco minutos, demandam processamento *Edge Computing* local para garantir autonomia decisória mesmo em condições de conectividade limitada. Os parâmetros não críticos, com tolerâncias temporais superiores, podem aproveitar as vantagens de transmissão *LoRaWAN* para análise centralizada e correlação com dados históricos. Esta estruturação permite otimização de recursos computacionais e energéticos, direcionando capacidades de processamento local para funções de segurança crítica enquanto mantém visibilidade operacional abrangente através da rede de comunicação de longo alcance.

Kumar, Paul e Ananda (2023) desenvolveram um Dispositivo de Monitoramento de Gases Subterrâneo (UGMD) que monitora continuamente as concentrações de O₂, CH₄, CO, CO₂ e H₂S, bem como a temperatura e umidade em minas de carvão subterrâneas próximas à área de trabalho. O sistema desenvolvido demonstrou que se a concentração de qualquer gás, exceto oxigênio, exceder o limite permitido e a quantidade de O₂, em particular, diminuir abaixo do limite especificado pelo usuário, um sistema de alarme é imediatamente ativado no UGMD, no repetidor de sinal (*booster* - dispositivo intermediário que amplifica e retransmite o sinal *LoRaWAN*) e no sistema de superfície. Durante os testes práticos, o sistema demonstrou capacidade de resposta rápida essencial para prevenção de acidentes.

O sistema UGMD desenvolvido por Kumar, Paul e Ananda (2023) foi validado experimentalmente em modelo de mina subterrânea, demonstrando capacidade de resposta automática inferior a 500 milissegundos para detecção de gases perigosos. Durante os testes controlados com liberação de gases pressurizados (CH₄, CO, CO₂, H₂S) em concentrações acima dos limites regulamentares estabelecidos pelo *Coal Mine Regulations 2017*, o sistema ativou automaticamente alarmes visuais (LED vermelho), sonoros (*buzzer*) e informativos (mensagem "*ALERT HIGH*" no display LCD) tanto no dispositivo subterrâneo quanto no sistema de superfície, mantendo funcionalidade autônoma mesmo durante perda de conectividade de rede.

Tabela 6 - Dados Experimentais do Sistema UGMD: Limites Críticos e Ações Automáticas Verificadas

Parâmetro Monitorado	Limite Crítico (CMR 2017)	Concentração Testada	Ação Automática Verificada	Tempo de Resposta
----------------------	---------------------------	----------------------	----------------------------	-------------------

Metano (CH ₄)	> 0,75% (galerias entrada)	1,0% - 1,5%	LED vermelho + Buzzer + "ALERT HIGH"	< 500 ms
Oxigênio (O ₂)	< 19%	18% - 16%	LED vermelho + Buzzer + "ALERT HIGH"	< 500 ms
Monóxido de Carbono (CO)	> 0,005% (50 ppm)	60 - 100 ppm	LED vermelho + Buzzer + "ALERT HIGH"	< 500 ms
Dióxido de Carbono (CO ₂)	> 0,5%	0,7% - 1,0%	LED vermelho + Buzzer + "ALERT HIGH"	< 500 ms
Sulfeto de Hidrogênio (H ₂ S)	> 0,0005% (5 ppm)	8 - 12 ppm	LED vermelho + Buzzer + "ALERT HIGH"	< 500 ms

Fonte: Adaptado de Kumar, Paul e Ananda (2023)

O armazenamento e retenção de dados em sistemas de monitoramento de mineração devem ser implementados de forma estruturada que permita não apenas conformidade com requisitos operacionais, mas também análise de tendências e identificação de padrões que possam prevenir incidentes futuros. A NR-22 estabelece que devem ser mantidos registros relacionados ao Programa de Gerenciamento de Riscos (PGR), embora não especifique um período mínimo de retenção de dados de monitoramento contínuo (BRASIL, 2024).

3.2 Densidade e Distribuição de Sensores

A determinação da densidade de sensores (medida em sensores por metro quadrado) deve considerar o perfil de risco específico de cada área operacional, indo além de uma abordagem uniforme de distribuição. A densidade é calculada através da razão entre o número total de nós sensores necessários e a área total de cobertura da mina, constituindo métrica fundamental para otimização de recursos e garantia de cobertura adequada (MEDINA *et al.*, 2024).

A experiência documentada por Kumar, Paul e Ananda (2023) em ambiente de mina experimental demonstrou que para situações sem linha de visada direta (*non-line of sight*), características de áreas críticas como frentes de lavra e cruzamentos, o alcance efetivo de comunicação limita-se a 15 metros. Para galerias principais com linha de visada direta (*line of sight*), o sistema alcança até 150 metros. Esta diferença

fundamental na propagação de sinais determina a necessidade de *Boosters* intermediários a cada 15 metros em áreas críticas e a cada 150 metros em galerias principais para manter comunicação confiável (Tabela 6).

Tabela 7 - Espaçamento de Dispositivos *LoRaWAN* em Mineração Subterrânea Baseado em Condições de Propagação

Tipo de Área		Condição de Propagação	Alcance Documentado	Espaçamento de Boosters	Referência
Áreas Críticas (frentes de lavra, cruzamentos)		Sem linha de visada direta	15 metros	A cada 15 metros	Kumar, Paul e Ananda (2023)
Galerias Principais (corredores diretos)		Linha de visada direta	150 metros	A cada 150 metros	Kumar, Paul e Ananda (2023)

Fonte: Kumar, Paul e Ananda (2023).

Medina *et al.* (2024) desenvolveram metodologia de otimização para posicionamento de sensores através de algoritmo computacional em duas etapas, combinando posicionamento determinístico em locais críticos com distribuição randômica para cobertura completa. A abordagem foi validada através de simulações computacionais em duas configurações de minas subterrâneas.

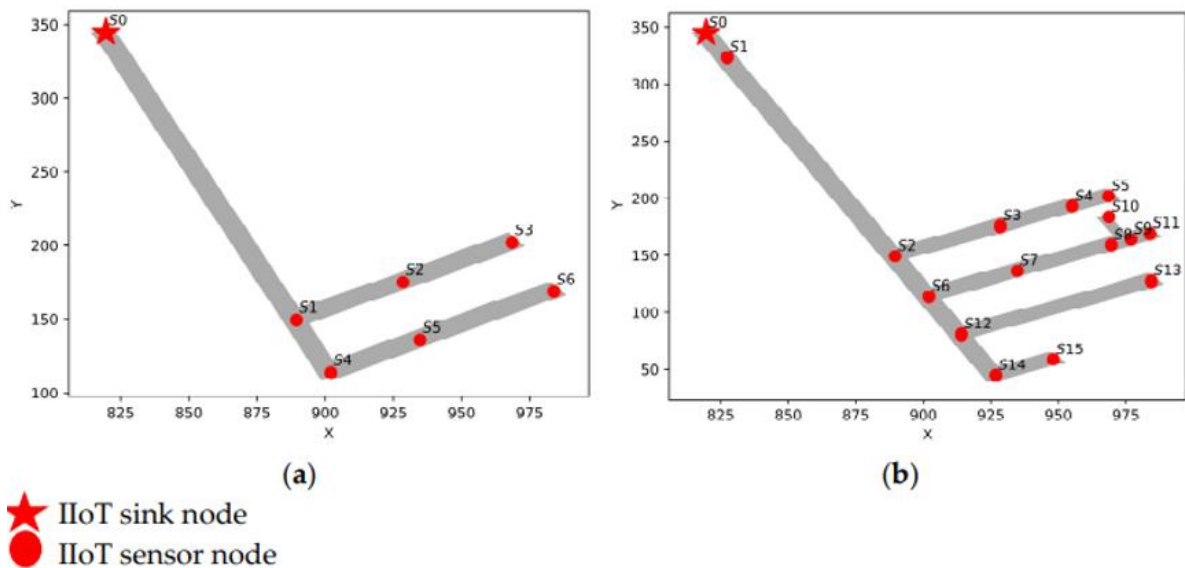
A ferramenta computacional desenvolvida em *Python* por Medina *et al.* (2024) foi disponibilizada publicamente para uso da comunidade, permitindo que outras operações de mineração possam replicar a metodologia de otimização. O algoritmo considera as características geométricas específicas de cada mina, incluindo dimensões das galerias, localização de pontos críticos como portais e cruzamentos, e requisitos de redundância para garantir detecção confiável de atmosferas explosivas.

A implementação de redes de sensores sem fio subterrâneas utiliza diferentes tipos de dispositivos com funções específicas. Os *IIoT sensor nodes* são os dispositivos finais enterrados que coletam dados ambientais como pressão, temperatura e umidade em sistemas de distribuição de água. Os *IIoT sink nodes* funcionam como pontos coletores que recebem dados de múltiplos sensores distribuídos na área e os retransmitem para sistemas de supervisão na superfície.

As coordenadas x e y indicam o posicionamento geográfico dos dispositivos, essencial para otimizar a cobertura da rede subterrânea. Na metodologia proposta por Medina *et al.* (2024), o software lê uma tabela de dados contendo as coordenadas

(eixos x e y), a elevação do terreno e a convenção para cada mudança no terreno. As coordenadas representam o sistema de posicionamento bidimensional da mina em metros, onde o eixo X corresponde à extensão longitudinal dos túneis e o eixo Y representa a largura ou extensão transversal, permitindo o mapeamento preciso da localização de cada sensor para garantir cobertura adequada e otimizar a comunicação entre os dispositivos na rede *LoRaWAN* subterrânea (Figura 8).

Figura 8 - Distribuição otimizada de sensores *LoRaWAN*



Fonte: Medina *et al.* (2024).

3.3 Capacidades de Processamento Distribuído

O processamento de dados em sistemas híbridos deve ser estruturado para maximizar eficiência enquanto minimiza latência e consumo energético. A implementação de capacidade computacional local representa necessidade operacional crítica em ambientes caracterizados por conectividade intermitente e requisitos de resposta em tempo real.

Nos sensores, o processamento deve incluir filtragem de ruído em tempo real e detecção imediata de condições anormais. A implementação de filtros adaptativos diretamente nos microcontroladores pode reduzir transmissões desnecessárias significativamente (LIU *et al.*, 2021). Esta capacidade de pré-processamento permite que apenas informações relevantes sejam transmitidas, otimizando o uso da limitada largura de banda disponível em redes *LoRaWAN*.

Nos *gateways edge*, processamento mais sofisticado possibilita correlação de

dados de múltiplos sensores e implementação de algoritmos de detecção de padrões. Liu *et al.* (2021) demonstraram que a fusão de dados de diferentes fontes permite validação cruzada, reduzindo significativamente falsas detecções sem comprometer a sensibilidade do sistema, estabelecendo equilíbrio crítico entre segurança e produtividade operacional.

3.4 Requisitos de Comunicação e Resiliência

A infraestrutura de comunicação deve garantir entrega confiável de dados críticos mesmo em condições adversas. A frequência de operação deve ser selecionada baseada em testes empíricos específicos para cada ambiente, considerando que características geológicas e estruturais afetam significativamente a propagação de sinais. Kumar, Paul e Ananda (2023) demonstraram experimentalmente que frequências de 433 MHz oferecem propagação superior em túneis estreitos com alto conteúdo mineral, alcançando mais de 150 metros em linha de visada direta (*line of sight* - quando não há obstáculos físicos entre transmissor e receptor) e 15 metros em condições sem linha de visada (*non-line of sight* - quando existem obstáculos como curvas, pilares ou estruturas rochosas bloqueando o caminho direto do sinal), enquanto Medina *et al.* (2024) validaram o uso da mesma frequência (433 MHz) com alcance confiável de até 35 metros em ambiente real de mina.

O sistema deve manter capacidade operacional mínima durante falhas parciais de infraestrutura. Kumar, Paul e Ananda (2023) demonstraram que se a conexão de rede for perdida entre o UGMD (*Underground Gas Monitoring Device* - Dispositivo de Monitoramento de Gases Subterrâneo) e o sistema de superfície, o UGMD ainda pode funcionar independentemente para monitorar as concentrações de gás e ativar alarmes locais. Isto significa que a perda de conectividade com sistemas centrais não pode comprometer funções críticas de segurança.

Medina *et al.* (2024) enfatizam que cada nó sensor deve ser capaz de operar de forma autônoma, implementando capacidades de tomada de decisão local baseadas em limiares pré-configurados e algoritmos adaptativos que respondem às condições observadas. Esta resiliência através de inteligência distribuída garante que alertas críticos sejam gerados mesmo quando a infraestrutura de comunicação principal está comprometida.

3.5 Sustentabilidade Energética

A autonomia energética representa desafio fundamental em ambientes onde acesso para manutenção é complexo e custoso. O consumo energético deve ser otimizado em múltiplas dimensões, desde a seleção de componentes até a implementação de algoritmos adaptativos de gerenciamento de energia.

Para operação normal, sistemas de monitoramento em mineração subterrânea devem alcançar autonomia energética adequada para minimizar intervenções de manutenção em ambientes de difícil acesso. A autonomia das baterias depende diretamente do ciclo de trabalho dos dispositivos, que define a relação entre o tempo ativo de transmissão e o período total de operação.

Os dispositivos desenvolvidos devem ser projetados para operar de forma autônoma por períodos prolongados, característica essencial para ambientes onde o acesso para manutenção é limitado. Durante situações de emergência, quando monitoramento intensivo é necessário, o sistema deve manter capacidade operacional mesmo com aumento na frequência de medições e transmissões. Esta flexibilidade operacional garante que o sistema permaneça funcional quando mais necessário, conforme demonstrado nos testes práticos realizados por Kumar, Paul e Ananda (2023) em ambiente de mina experimental.

O balanceamento entre funcionalidade e consumo energético requer abordagem adaptativa onde parâmetros operacionais ajustam-se dinamicamente baseados em condições observadas e estado das baterias. Zhao *et al.* (2023) demonstraram que algoritmos de otimização baseados em aprendizado de máquina podem estender vida útil das baterias em 40% através de ajuste inteligente de parâmetros de transmissão e processamento.

3.6 Adaptabilidade e Evolução

Os requisitos estabelecidos devem acomodar a natureza dinâmica das operações de mineração, onde geometria dos túneis evolui continuamente e novos riscos podem emergir (MEDINA *et al.*, 2024). O sistema deve permitir adição e remoção de sensores sem necessidade de reconfiguração completa, adaptando-se organicamente às mudanças operacionais (KUMAR; PAUL; ANANDA, 2023).

A arquitetura deve também antecipar evolução regulatória e tecnológica. Novos parâmetros de monitoramento podem tornar-se obrigatórios, e avanços tecnológicos

podem oferecer capacidades anteriormente indisponíveis (MUSONDA *et al.*, 2024). A modularidade e uso de protocolos abertos garantem que investimentos atuais não se tornem obsoletos prematuramente, permitindo evolução incremental do sistema conforme necessidades e possibilidades expandem (SITTÓN-CANDANEDO *et al.*, 2020).

Esta visão de requisitos estabelece fundação sólida para implementação de sistemas autônomos que não apenas atendem necessidades atuais, mas também possuem flexibilidade para evoluir com as demandas futuras da indústria de mineração subterrânea (CHENG *et al.*, 2021).

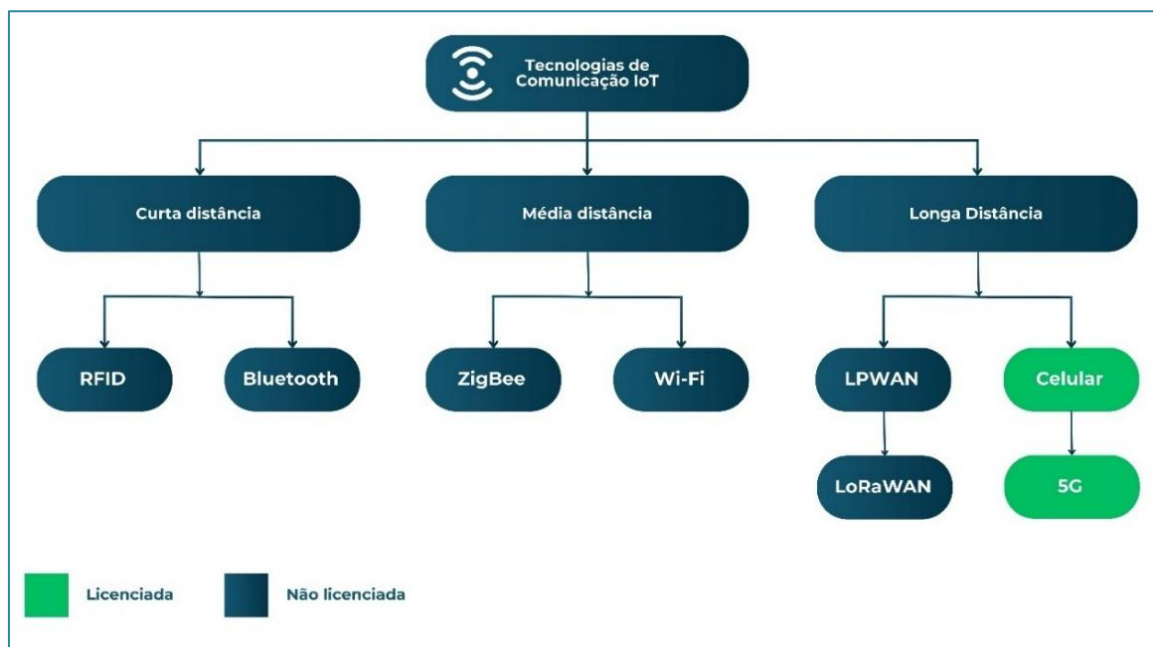
CAPÍTULO 4 - ANÁLISE COMPARATIVA E SINERGIAS TECNOLÓGICAS

A seleção de tecnologias apropriadas para mineração subterrânea requer análise criteriosa que considere não apenas capacidades técnicas individuais, mas principalmente as sinergias emergentes da integração entre diferentes abordagens. Esta análise comparativa baseia-se em dados experimentais coletados em implementações reais, proporcionando base empírica para tomada de decisão informada.

4.1 Desempenho Comparativo de Tecnologias de Comunicação

As tecnologias de comunicação sem fio são classificadas segundo três critérios fundamentais: licenciamento (licenciadas e não licenciadas), alcance operacional (longo alcance, médio alcance e curto alcance) e infraestrutura (celulares e não celulares), estabelecendo categorização que determina adequação para diferentes aplicações industriais, conforme documentado por Musonda *et al.* (2024) (Figura 9).

Figura 9 - Diagrama de Alcance e Densidade de Infraestrutura entre Tecnologias de Comunicação em Mineração Subterrânea



Fonte: Adaptado de Musonda (2024)

Esta diferenciação por alcance operacional demonstra que tecnologias de longa distância como *LoRaWAN* reduzem drasticamente os requisitos de infraestrutura intermediária, impactando diretamente a viabilidade econômica e operacional em ambientes subterrâneos onde cada equipamento adicional representa aumento exponencial na complexidade de manutenção.

A seleção de tecnologia de comunicação adequada para ambientes de mineração subterrânea requer análise sistemática de múltiplos parâmetros técnicos, operacionais e econômicos. As medições experimentais conduzidas em diferentes contextos geográficos e operacionais revelam variações significativas de desempenho entre as tecnologias disponíveis, impactando diretamente a viabilidade de implementação. A análise comparativa entre as principais tecnologias de comunicação sem fio consideradas para aplicações industriais baseia-se em parâmetros técnicos documentados por Mekki *et al.* (2019), Molano (2018) e Villarim *et al.* (2023), (Tabela 8)

Tabela 8- Principais Parâmetros Documentados - Tecnologias de Comunicação IoT

Parâmetro	Bluetooth	Wi-Fi	Zigbee	LoRa	Sigfox	NB-IoT
Frequência	2,4 GHz	2,4 GHz / 5 GHz	2,4 GHz	433 MHz / 868 MHz / 915 MHz	868 MHz (Europa) / 915 MHz (EUA)	Bandas licenciadas LTE
Taxa de dados	1-3 Mbps	1-600 Mbps	20-250 kbps	0,3-50 kbps	100-600 bps (<i>uplink</i>)	200 kbps (<i>uplink</i>)
Alcance Médio	10-30 m	20-50 m	30-50 m	2-8 km	1-5 km	1-5 km
Licenciada	Não	Não	Não	Não (ISM)	Não (ISM)	Sim
Largura de banda	1-3 MHz	20-160 MHz	2 MHz	125-500 kHz	100 Hz	180 kHz
Topologia	<i>Mesh</i> / P2P	Estrela	<i>Mesh</i>	Estrela	Estrela	Celular
Bidirecional	Sim	Sim	Sim	Sim (limitado)	Limitado	Sim
Consumo relativo	Médio	Alto	Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo	Baixo
Sensibilidade	-95 dBm	-90 dBm	-100 dBm	-148 dBm	-142 dBm	-130 dBm
Potência de Transmissão	4 dBm	20 dBm	0 dBm	10-14 dBm	14-27 dBm	20-23 dBm
SNR Mínima Operacional	> 8 dB	> 10 dB	> 5 dB	-20 dB	-20 dB	-15 dB

Fonte: Adaptado de Mekki *et al.* (2019), Molano (2018) e Villarim *et al.* (2023).

A tecnologia *LoRa* possui características técnicas distintivas para aplicações de monitoramento em sistemas de longa distância com restrições energéticas. A modulação *Chirp Spread Spectrum* (CSS) proporciona sensibilidade de recepção de até -148 dBm, superando significativamente Wi-Fi (-90 dBm) e *Bluetooth* (-95 dBm), conforme documentação da Semtech Corporation (SEMTECH, 2015).

A capacidade de operação com SNR negativa de até -20 dB permite comunicação confiável em condições adversas de propagação (LORAWAN ALLIANCE, 2020).

O alcance operacional médio de 2-8 km oferece vantagem substancial para aplicações que demandem cobertura extensa com infraestrutura mínima. A utilização de bandas ISM (433 MHz, 868 MHz, 915 MHz) elimina custos recorrentes de licenciamento e proporciona independência de operadoras de telecomunicações (LORAWAN ALLIANCE, 2020). A eficiência energética viabiliza autonomia operacional de múltiplos anos com alimentação por bateria, emergindo do protocolo MAC baseado em ALOHA puro que mantém dispositivos em baixo consumo (ADELANTADO *et al.*, 2017).

A tecnologia possui limitações significativas que restringem aplicabilidade em determinados contextos. A taxa de dados entre 0,3-50 kbps impede transmissão de grandes volumes de dados como sistemas multimídia. A largura de banda restrita (125-500 kHz) e natureza half-duplex impedem comunicação bidirecional simultânea (AUGUSTIN *et al.*, 2016). A capacidade limitada de *downlink*, com apenas duas janelas de recepção após cada transmissão, restringe controle remoto em tempo real.

LoRa oferece solução adequada para monitoramento distribuído com requisitos de longo alcance, baixo consumo energético e transmissão periódica de pequenos volumes de dados, priorizando eficiência energética sobre taxa de dados e latência.

4.2 Paradigmas de Processamento e suas Implicações

A escolha entre diferentes paradigmas de processamento impacta fundamentalmente a capacidade de resposta e eficiência dos sistemas de monitoramento.

A análise das implementações documentadas revela diferenças significativas entre processamento centralizado, distribuído e híbrido, baseada nas evidências práticas coletadas pelos pesquisadores.

Kumar, Paul e Ananda (2023) desenvolveram um sistema UGMD que demonstra as vantagens do processamento distribuído em aplicações de segurança, utilizando microcontroladores *Teensy 3.2* baseados em ARM Cortex-M4 operando a 72 MHz para detecção de limiares e processamento local. Durante os testes, verificaram que se a conexão de rede for perdida entre o UGMD e o sistema de superfície, o dispositivo ainda pode funcionar independentemente para monitorar concentrações de gás e ativar alarmes locais, demonstrando que processamento básico pode ser realizado eficientemente em *hardware* de baixo consumo.

Esta capacidade de operação autônoma exemplifica os benefícios do processamento local distribuído em ambientes onde a conectividade pode ser intermitente, sendo confirmada por Santos *et al.* (2022) através de dispositivos de baixo custo utilizando plataformas Arduino e ESP32 com desempenho adequado para monitoramento de parâmetros críticos.

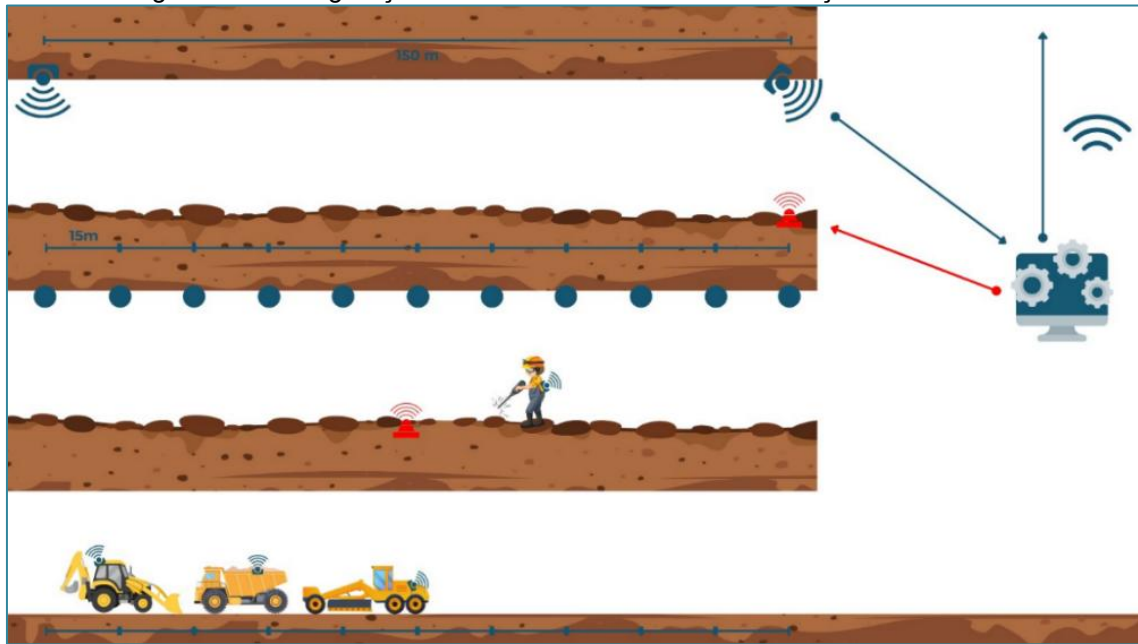
A abordagem híbrida, combinando processamento local com supervisão centralizada, emerge como solução mais adequada baseada nas evidências. Medina *et al.* (2024) documentaram que o tempo de detecção de atmosferas explosivas foi reduzido para menos de 100 milissegundos através de processamento em *gateways Raspberry Pi 4*, superando significativamente requisitos regulatórios de 30 segundos.

A convergência de evidências indica que sistemas híbridos oferecem o melhor equilíbrio entre autonomia operacional e integração sistêmica. Esta conclusão fundamenta-se na capacidade documentada de manter funções críticas de segurança localmente enquanto preserva capacidades de supervisão e análise global quando conectividade está disponível.

4.3 Arquiteturas de Referência Validadas

Medina *et al.* (2024) identificaram três topologias principais adequadas a diferentes contextos operacionais. A topologia linear é apropriada para desenvolvimento horizontal, que consiste na escavação de galerias e túneis seguindo o mesmo nível ou elevação da mina, tipicamente acompanhando camadas mineralizadas horizontais. Este método contrasta com o desenvolvimento vertical, que compreende a construção de poços verticais e rampas inclinadas conectando diferentes níveis da mina para acesso a maiores profundidades (Figura 10).

Figura 10 - Configurações de Desenvolvimento em Mineração Subterrânea



Fonte: Adaptado de Medina et al. (2024)

O *longwall mining* exemplifica o desenvolvimento horizontal como sistema de mineração subterrânea altamente mecanizado.

Nesta configuração, gateways são posicionados com sobreposição para garantir redundância, demonstrando eficácia com investimento proporcional à extensão da operação conforme documentado por Kumar, Paul e Ananda (2023).

Em contraste, a topologia em estrela otimiza recursos para operações verticais, utilizando *gateway* principal com antenas direcionais que cobrem múltiplos níveis. Implementação em mina sul-africana com oito níveis e 2.000 metros de profundidade alcançou cobertura completa com um *gateway* principal e 16 repetidores estrategicamente posicionados, demonstrando escalabilidade vertical da solução (MUSONDA et al., 2024).

Geometrias complexas com múltiplas interconexões demandam topologia em malha parcial – uma arquitetura híbrida onde nós críticos (*gateways*) conectam-se entre si formando uma rede *mesh* redundante (*backbone*), enquanto sensores individuais mantêm conexão simples em estrela com o *gateway* mais próximo (MEDINA et al., 2024). Esta configuração combina a alta confiabilidade da malha no núcleo da rede com a simplicidade e eficiência energética da topologia estrela para dispositivos finais, otimizando recursos sem comprometer resiliência operacional (MUSONDA et al., 2024; CHENG et al., 2021).

Estas arquiteturas validadas estabelecem padrões replicáveis que reduzem riscos de implementação e aceleram a adoção em novas operações (CHENG *et al.*, 2021).

4.4 Viabilidade Econômica

A análise de viabilidade econômica dos sistemas *LoRaWAN-Edge Computing* deve considerar múltiplos fatores além do investimento inicial em *hardware*. Kumar, Paul e Ananda (2023) demonstraram que sistemas baseados em *LoRa* para monitoramento de gases subterrâneos representam economia significativa comparado a sistemas convencionais cabeados, com redução de custos de instalação e manutenção.

A arquitetura proposta por Medina *et al.* (2024) demonstrou eficiência superior em densidade de sensores necessários por área coberta. A metodologia desenvolvida pelos autores utilizou algoritmo de otimização em duas etapas – primeiro posicionando sensores deterministicamente em pontos críticos (portais, cruzamentos, frentes de trabalho), depois aplicando distribuição randômica otimizada para cobertura completa.

Esta abordagem híbrida alcançou densidade de cobertura de aproximadamente 0,0274 sensores por metro quadrado, comparado a 0,0346 sensores/m² da metodologia de distribuição uniforme tradicional e 0,0358 sensores/m² da metodologia baseada em grade regular, ambas comumente utilizadas em implementações convencionais (MEDINA *et al.*, 2024).

Santos *et al.* (2022) desenvolveram dispositivos de monitoramento com custo aproximado de US\$ 50 por unidade, demonstrando que soluções de baixo custo podem alcançar desempenho adequado para aplicações de segurança em mineração. A redução na necessidade de manutenção através de sistemas autônomos com armazenamento local representa benefício econômico adicional, especialmente considerando os custos operacionais de acesso a ambientes subterrâneos.

A implementação de sistemas híbridos *LoRaWAN-Edge Computing* justifica-se principalmente pela capacidade de prevenção de acidentes e melhoria nas condições de segurança operacional. Embora análises quantitativas detalhadas de retorno sobre investimento dependam de características específicas de cada operação, os casos estudados sugerem que a redução de riscos pode proporcionar justificativa econômica para implementação destes sistemas.

CAPÍTULO 5 - ESTUDOS DE CASO REPRESENTATIVOS

A validação prática de sistemas híbridos *LoRaWAN - Edge Computing* em diferentes contextos geográficos e operacionais fornece evidências empíricas essenciais sobre viabilidade, desafios e oportunidades desta tecnologia. Os três casos analisados – implementações em minas de carvão indianas, colombianas e desenvolvimentos brasileiros – foram selecionados por representarem diversidade de abordagens, contextos regulatórios e soluções técnicas, oferecendo perspectiva abrangente sobre o estado atual e potencial futuro destes sistemas.

5.1 Sistema de Monitoramento em Minas de Carvão Indianas

O desenvolvimento do *Underground Gas Monitoring Device* (UGMD) pelo *Indian Institute of Technology em Dhanbad* representa marco significativo na aplicação de tecnologia *LoRaWAN* com elementos de processamento distribuído em ambientes de alto risco. O contexto das minas de carvão indianas, com 411 fatalidades globais por explosões de gases entre 2010 e 2021, estabeleceu urgência para desenvolvimento de soluções robustas e economicamente acessíveis.

A implementação enfrentou desafios específicos das minas indianas, caracterizadas por galerias estreitas de 2m × 2m e profundidades operacionais entre 10 e 15 metros. A regulamentação da *Directorate General of Mine Safety* através do *Coal Mine Regulations 2017*, exigindo monitoramento contínuo em minas categoria III onde a concentração de metano excede 0,3%, definiu requisitos não-negociáveis que orientaram o design do sistema.

A solução desenvolvida por Kumar, Paul e Ananda (2023) integrou microcontroladores *Teensy 3.2* baseados em ARM Cortex-M4 operando a 72 MHz, implementando processamento local para detecção de limiares antes da transmissão. Embora limitada pela capacidade computacional do *hardware* selecionado, esta arquitetura demonstrou efetivamente o valor do processamento hierárquico. Operando em 433 MHz na banda ISM indiana com potência de 10 dBm, o sistema alcançou alcance de 800 a 1200 metros em linha de visada, confirmando a adequação de frequências sub-GHz para estes ambientes.

O protocolo de validação no modelo de mina dos *Kolar Gold Fields* incluiu 500 medições de RSSI em 20 posições diferentes, estabelecendo base estatística robusta. A liberação controlada de gases pressurizados permitiu validação precisa dos algoritmos de detecção. Durante seis meses de operação contínua, o sistema manteve taxa de erro de pacotes abaixo de 1% para distâncias até 35 metros, com tempo de resposta inferior a 500 milissegundos para detecção de gases perigosos e disponibilidade operacional de 99,7%.

O impacto econômico foi igualmente significativo. Com investimento total de USD 15.000, a solução representou economia de 70% comparada aos USD 50.000 típicos de sistemas cabeados equivalentes. A redução de 80% no tempo de manutenção através de diagnóstico remoto e a eliminação de falsas evacuações, estimada em USD 100.000 anuais em perdas de produção evitadas, demonstraram viabilidade econômica da abordagem.

5.2 Metodologia de Implementação Otimizada na Colômbia

A contribuição colombiana, desenvolvida pela *Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia*, transcende implementação técnica individual para estabelecer metodologia sistemática de implementação aplicável a diversos contextos operacionais. O cenário colombiano, com 1.476 fatalidades em 1.316 emergências minerárias entre 2005 e 2019, criou imperativo para desenvolvimento de abordagens que pudessem ser rapidamente escaladas através do setor.

O Decreto 1886/2015 estabeleceu *framework* regulatório claro com três categorias de minas baseadas em concentração de metano, demandando soluções adaptadas para operações de diferentes portes e recursos. Esta diversidade regulatória e operacional motivou Medina *et al.* (2024) a desenvolver não apenas um sistema, mas uma metodologia replicável de implementação.

A arquitetura desenvolvida evoluiu significativamente em sofisticação, incorporando processamento *edge* genuinamente distribuído. Processadores ARM Cortex-M4 nos nós sensores implementaram algoritmos de detecção de anomalias baseados em desvio estatístico, processando janelas deslizantes de 100 amostras para identificação de padrões anormais antes da transmissão. Esta capacidade de processamento local permitiu redução drástica no volume de dados transmitidos sem comprometer capacidade de detecção.

A principal inovação metodológica foi o desenvolvimento de ferramenta computacional em *Python* para otimização da implementação, disponibilizada publicamente para uso da comunidade. O algoritmo em duas etapas combina posicionamento determinístico em locações críticas – portais, cruzamentos, frentes de trabalho – com distribuição randômica otimizada para garantir cobertura completa. Esta abordagem híbrida reconhece que certos pontos são intrinsecamente críticos enquanto outros podem ser otimizados computacionalmente.

A validação em duas minas de diferentes dimensões forneceu evidência empírica robusta. Na mina pequena de 265m × 98m em dois níveis, 15 nós determinísticos complementados por 19-26 nós randômicos alcançaram cobertura completa em 74,8% das simulações. Na mina média de 345m × 98m em quatro níveis, 16 nós determinísticos e 25-33 randômicos proporcionaram redundância $k=2$ em 53% dos casos, essencial para aplicações críticas. A densidade alcançada representou redução de 20-23% em nós necessários comparado a metodologias convencionais.

O tempo de detecção de atmosferas explosivas foi reduzido para menos de 100 milissegundos através de processamento em *gateways Raspberry Pi 4*, superando significativamente requisitos regulatórios de 30 segundos. A fusão de dados de múltiplos sensores reduziu falsas evacuações em 85% mantendo detecção perfeita de eventos reais, demonstrando que segurança aprimorada não requer sacrifício de produtividade.

5.3 Desenvolvimento de Soluções de Baixo Custo no Brasil

O contexto brasileiro para implementação de sistemas híbridos apresenta características distintas que demandam abordagens específicas, particularmente considerando a diversidade do setor mineral nacional e a necessidade de soluções economicamente acessíveis. Os trabalhos desenvolvidos por Santos (2020) na Universidade Federal de Minas Gerais e Silva (2022) na Universidade Federal de Ouro Preto representam esforço coordenado para criar tecnologias adaptadas às condições e recursos locais.

A motivação emergiu da combinação entre requisitos da NR-22 para monitoramento contínuo de parâmetros ambientais e a necessidade de soluções com custo acessível para mineradoras de diferentes portes.

Santos (2020) desenvolveu dispositivos de monitoramento com custo aproximado de US\$ 50, representando alternativa acessível comparada a sistemas importados, contribuindo para democratizar o acesso a tecnologia de monitoramento no setor mineral brasileiro.

A arquitetura técnica desenvolvida por Santos (2020) utilizou Arduino e ESP32 como plataformas base, com sensores BME280 para monitoramento de temperatura, umidade e pressão. O sistema desenvolvido focou em armazenamento local de dados em cartão SD e transmissão via Wi-Fi quando disponível, demonstrando que soluções de baixo custo podem ser viáveis para monitoramento em mineração. A validação em ambiente de laboratório de ventilação demonstrou confiabilidade operacional adequada.

CAPÍTULO 6 - SÍNTESE E DIRETRIZES CONCEITUAIS PARA IMPLEMENTAÇÃO

A convergência de evidências dos casos analisados estabelece base sólida para formulação de diretrizes práticas que orientem futuras implementações de sistemas híbridos *LoRaWAN - Edge Computing* em mineração subterrânea. As lições aprendidas através de contextos diversos convergem em princípios fundamentais que transcendem variações locais, oferecendo roteiro estruturado para organizações que buscam modernizar seus sistemas de monitoramento e segurança.

6.1 Roteiro Estruturado de Implementação

A experiência acumulada sugere abordagem faseada que minimiza riscos enquanto maximiza aprendizado organizacional. O processo inicia com período de três meses dedicado à caracterização detalhada do ambiente operacional, investimento que Kumar, Paul e Ananda (2023) demonstraram reduzir retrabalho posterior em 40%. Esta fase deve mapear não apenas características de propagação de sinais, mas também padrões operacionais, pontos críticos de risco e interferências eletromagnéticas específicas. A importância desta etapa inicial fundamenta-se na necessidade de compreender as particularidades de cada ambiente, evitando problemas de cobertura e desempenho que comprometem a eficácia do sistema.

Segue-se implementação de projeto piloto em área controlada, preferencialmente não-crítica para operações, permitindo validação de configurações e familiarização das equipes com a tecnologia. Este piloto deve incluir todas as funcionalidades previstas para o sistema completo, evitando surpresas durante expansão. Medina *et al.* (2024) documentaram que pilotos bem executados aceleram implementação total em 50% através da identificação precoce de desafios de integração e desenvolvimento de competências locais.

A expansão deve ser progressiva e baseada em valor demonstrado. Iniciando por áreas de maior risco onde benefícios de segurança são mais evidentes, cada fase de expansão deve demonstrar retorno mensurável antes de prosseguir. Esta abordagem incremental, validada por Santos *et al.* (2022), facilita absorção organizacional das mudanças e permite ajustes baseados em aprendizados reais ao invés de suposições teóricas.

O processo não termina com a implementação completa. Estabelecimento de ciclo contínuo de otimização baseado em dados operacionais coletados é essencial para maximizar valor do investimento. Zhao *et al.* (2023) demonstraram que ajustes pós-implementação podem melhorar desempenho em até 40% sem necessidade de *hardware* adicional, simplesmente através de refinamento de parâmetros e algoritmos baseado em comportamento observado do sistema.

A documentação sistemática de cada fase constitui elemento fundamental frequentemente subestimado. Registro detalhado de decisões técnicas, desafios encontrados e soluções implementadas cria base de conhecimento valiosa para expansões futuras e facilita transferência de conhecimento entre equipes (MUSONDA *et al.*, 2024). Esta memória institucional reduz dependência de indivíduos específicos e acelera resolução de problemas recorrentes.

6.2 Considerações Técnicas Críticas

A seleção de parâmetros técnicos deve evitar a busca por soluções universais, reconhecendo que cada ambiente apresenta características únicas que demandam validação empírica específica. A frequência de operação exemplifica este princípio: enquanto 433 MHz demonstrou propagação superior em túneis estreitos indianos, operações colombianas obtiveram resultados adequados com 915 MHz em galerias mais amplas (KUMAR; PAUL; ANANDA, 2023; MEDINA *et al.*, 2024).

No Brasil, a implementação formal deve seguir a regulamentação da ANATEL que estabelece a frequência de 915 MHz (banda de 902-928 MHz) para aplicações *IoT* e *LoRaWAN*, conforme Resolução 680/2017, embora estudos acadêmicos possam utilizar outras frequências para fins experimentais. Testes locais representam investimento essencial para garantir desempenho adequado do sistema, considerando tanto os requisitos regulatórios quanto as características específicas de propagação de cada ambiente.

O dimensionamento de capacidade computacional requer equilíbrio cuidadoso entre funcionalidade e sustentabilidade energética. Detecção básica de limiares opera eficientemente em microcontroladores simples, mas aplicações envolvendo reconhecimento de padrões ou fusão de dados demandam processadores mais capazes (LIU *et al.*, 2021).

A escolha não é binária entre simplicidade e sofisticação, mas representa um espectro onde o posicionamento ótimo depende de requisitos específicos e recursos disponíveis.

A densidade de sensores deve refletir análise de risco granular ao invés de distribuição uniforme. Concentração de recursos em pontos críticos frentes de lavra, rotas de evacuação, áreas com histórico de acumulação de gases proporciona melhor relação custo-benefício que cobertura homogênea (SANTOS *et al.*, 2022). Esta priorização baseada em risco, demonstrada consistentemente nos casos analisados, maximiza impacto de segurança dentro de orçamentos limitados.

A configuração de parâmetros de transmissão deve considerar compromissos técnicos entre confiabilidade, latência e consumo energético. O *Spreading Factor* (SF) do *LoRaWAN*, por exemplo, permite ajuste fino entre alcance e taxa de dados, mas valores elevados (SF11-SF12) aumentam significativamente o tempo no ar, impactando tanto consumo quanto capacidade da rede (ZHAO *et al.*, 2023). A otimização destes parâmetros requer análise sistemática das condições locais e requisitos operacionais.

A integração com sistemas legados representa desafio técnico frequentemente subestimado. Protocolos proprietários, formatos de dados incompatíveis e diferentes níveis de maturidade tecnológica demandam desenvolvimento de camadas de abstração e interfaces de tradução (CHENG *et al.*, 2021). O planejamento deve considerar não apenas a implementação de novos sistemas, mas também a coexistência harmoniosa com infraestrutura existente durante período de transição que pode estender-se por anos.

6.3 Fatores Organizacionais e Humanos

O sucesso da implementação de sistemas híbridos depende fundamentalmente da aceitação e engajamento da força de trabalho. A introdução de novas tecnologias em ambientes tradicionais de mineração frequentemente encontra diferentes níveis de receptividade, sendo importante considerar estas dinâmicas durante o planejamento.

Experiências práticas demonstram transformação significativa na aceitação quando trabalhadores experimentam benefícios diretos dos sistemas alertas preventivos de exposição a riscos, informações que facilitam tomada de decisão e redução de falsas evacuações (MEDINA *et al.*, 2024; KUMAR; PAUL; ANANDA, 2023).

Programas de capacitação devem enfatizar estes benefícios práticos, demonstrando como a tecnologia aprimora as condições de trabalho.

A governança de dados emerge como questão crítica no contexto de sistemas de monitoramento avançados. Além dos requisitos regulatórios mínimos de retenção estabelecidos pela NR-22, as políticas organizacionais devem definir claramente propriedade, acesso, uso e arquivamento de informações coletadas

A comunicação efetiva sobre objetivos e benefícios do sistema constitui elemento essencial para sucesso da implementação. A transparência quanto aos propósitos do monitoramento focados em segurança e eficiência operacional e o envolvimento das equipes no processo de *design* e implementação promovem senso de propriedade e reduzem resistências naturais à mudança (MEDINA *et al.*, 2024). Estabelecer canais de *feedback* contínuo permite ajustes baseados em experiências práticas dos usuários finais, melhorando tanto a eficácia do sistema quanto sua aceitação organizacional.

6.4 Gestão de Riscos e Sustentabilidade

A implementação de sistemas híbridos *LoRaWAN - Edge Computing* requer gestão sistemática de três categorias principais de riscos que podem impactar o sucesso do projeto:

Riscos Técnicos: Os desafios técnicos incluem interferências não previstas durante a fase de planejamento, degradação de desempenho ao longo do tempo devido a fatores ambientais e obsolescência de componentes que pode comprometer a continuidade operacional. A mitigação destes riscos requer adoção de margens de projeto conservadoras, implementação de arquitetura modular que permita atualizações incrementais e seleção criteriosa de tecnologias com roteiro de desenvolvimento bem definido pelos fabricantes (MUSONDA *et al.*, 2024).

Riscos Organizacionais: Os aspectos organizacionais, frequentemente subestimados na fase de planejamento, podem apresentar desafios superiores às barreiras técnicas. A resistência cultural à adoção de novas tecnologias, particularmente entre trabalhadores com longa experiência no setor, requer abordagem estruturada de gestão de mudança e demonstração consistente de valor agregado.

A continuidade do apoio gerencial durante as fases iniciais de implementação, quando desafios são mais frequentes, mostra-se fundamental para manutenção do impulso do projeto. Neste contexto, a capacidade de operação autônoma com armazenamento local de dados, validada por Santos *et al.* (2022) através de dispositivos com custo aproximado de US\$ 50, demonstra que soluções de baixo custo podem alcançar desempenho adequado para aplicações de segurança em mineração subterrânea, estabelecendo viabilidade técnica e econômica que facilita a aceitação organizacional em operações de diferentes portes.

Riscos Regulatórios: O ambiente regulatório dinâmico do setor de mineração apresenta riscos específicos que devem ser considerados. Mudanças normativas podem exigir modificações substanciais nos sistemas implementados ou até mesmo inviabilizar certas abordagens tecnológicas. O engajamento proativo com autoridades reguladoras, exemplificado pela colaboração documentada por Medina *et al.* (2024) com órgãos colombianos, não apenas facilita processos de conformidade, mas também pode influenciar positivamente o desenvolvimento de regulamentações que equilibrem requisitos de segurança com viabilidade técnica e econômica.

A sustentabilidade de longo prazo requer visão além da implementação inicial. Sistemas devem ser projetados considerando não apenas requisitos atuais mas capacidade de evolução futura. O uso de protocolos abertos, arquiteturas modulares e documentação abrangente protege investimentos contra obsolescência prematura (ZHAO *et al.*, 2023). O estabelecimento de métricas claras de desempenho e processos de melhoria contínua garante que sistemas permaneçam relevantes conforme necessidades operacionais e tecnológicas evoluem.

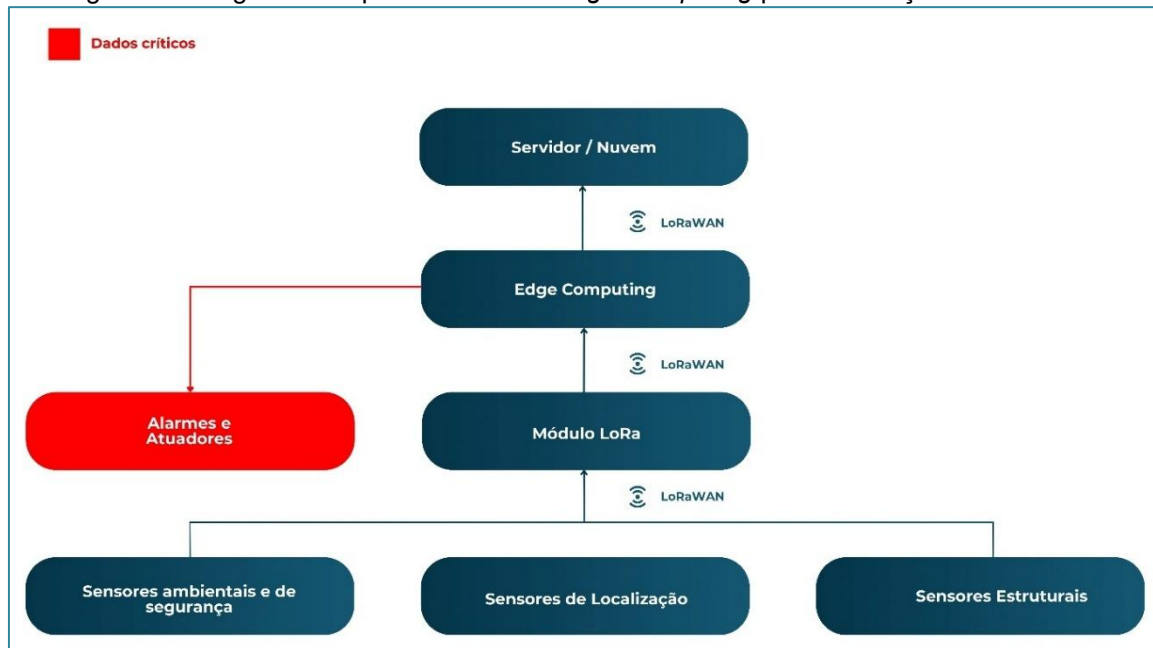
6.5 Perspectivas e Direções Futuras

O amadurecimento desta tecnologia abre múltiplas avenidas para desenvolvimento futuro.

A convergência com 5G privado promete resolver limitações de largura de banda do *LoRaWAN* para aplicações específicas como transmissão de vídeo ou telemetria de alta frequência, mantendo vantagens de processamento distribuído. Esta evolução não substituirá *LoRaWAN* mas complementará para casos de uso específicos onde maior capacidade justifica complexidade adicional.

A integração entre tecnologias *LoRa* e *Edge Computing* cria arquitetura distribuída onde nós sensores executam processamento local básico enquanto mantêm comunicação de longo alcance para supervisão centralizada, estabelecendo base para futuras expansões com inteligência artificial embarcada e conectividade híbrida (Figura 11).

Figura 11- Diagrama Simplificado *LoRa - Edge Computing* para Mineração Subterrânea



Fonte: Elaboração própria (2025)

Uma direção particularmente promissora para o contexto brasileiro refere-se ao desenvolvimento de topologias híbridas que combinam as vantagens da comunicação estrela do *LoRaWAN* com a redundância de redes *mesh* através de repetidores inteligentes. As minas brasileiras caracterizam-se predominantemente por operações sem linha de visada direta devido às dimensões reduzidas das galerias, curvas frequentes e presença de equipamentos que criam obstáculos físicos à propagação de sinais, demandando evolução além da topologia estrela tradicional.

A implementação de repetidores intermediários (*boosters*) posicionados estrategicamente permitiria estender o alcance da comunicação *LoRaWAN* para áreas com propagação limitada, mantendo a arquitetura fundamental em estrela enquanto cria pontos de retransmissão que amplificam o sinal em zonas de baixa cobertura. Esta abordagem preservaria a eficiência energética dos dispositivos finais através de comunicação direta quando possível, oferecendo rotas alternativas através de repetidores quando condições de propagação são adversas, representando adaptação específica às condições operacionais da mineração subterrânea nacional.

Desenvolvimento de padrões abertos que permitam integração transparente entre equipamentos de diferentes fornecedores reduziria custos e aumentaria flexibilidade. Iniciativas da indústria nesta direção, embora incipientes, são encorajadoras e merecem suporte ativo da comunidade.

A integração com inteligência artificial e aprendizado de máquina está apenas começando a ser explorada. Capacidade de processar e aprender com vastos volumes de dados históricos pode revelar padrões anteriormente invisíveis, permitindo predição de falhas, otimização de ventilação e até previsão de eventos geológicos. Esta evolução transformará sistemas de monitoramento reativos em plataformas preditivas de gestão de risco.

6.6 Considerações Finais

Esta investigação estabeleceu a viabilidade técnica e econômica de sistemas híbridos *LoRaWAN - Edge Computing* para aprimoramento da eficiência e segurança em operações de mineração subterrânea, atendendo ao objetivo geral através de análise sistemática que combinou revisão da literatura, análise comparativa de tecnologias e investigação de estudos de caso representativos.

A caracterização técnica das tecnologias *LoRaWAN* e *Edge Computing* demonstrou adequação específica para os desafios da mineração subterrânea. A modulação *LoRa* baseada em *Chirp Spread Spectrum* oferece robustez contra interferências eletromagnéticas características desses ambientes, enquanto frequências *sub-GHz* proporcionam penetração superior em estruturas rochosas comparada a tecnologias convencionais. A sensibilidade de recepção de até -150 dBm permite comunicação confiável mesmo com sinais severamente atenuados.

Paralelamente, *Edge Computing* viabiliza processamento distribuído com baixa latência para detecção e processamento de dados coletados em tempo real, atendendo aos requisitos regulatórios estabelecidos pela NR-22. A análise dos desafios e requisitos para implementação de sistemas *IoT* em mineração subterrânea revelou complexidade que vai além das considerações puramente tecnológicas. A classificação sistemática entre parâmetros críticos e não críticos, fundamentada nos requisitos da NR-22 e NR-15, estabeleceu estrutura operacional necessária para arquiteturas de processamento distribuído.

Parâmetros críticos com requisitos de resposta rápida demandam processamento *Edge Computing* local para autonomia decisória, enquanto parâmetros não críticos podem aproveitar as vantagens de transmissão *LoRaWAN* para análise centralizada.

A densidade de sensores otimizada alcançada pelos estudos analisados, conforme demonstrado por Medina *et al.* (2024), representa significativa redução na quantidade de dispositivos necessários comparada a metodologias convencionais de distribuição uniforme.

As investigações dos casos aplicados na Índia, Colômbia e Brasil comprovaram que é possível implementar sistemas híbridos *LoRaWAN-Edge Computing* com viabilidade técnica e econômica, demonstrando capacidade de redução significativa em falsas evacuações através de fusão de dados de múltiplos sensores e estabelecendo que soluções de baixo custo podem alcançar desempenho adequado para aplicações críticas de segurança em mineração subterrânea sem comprometer funcionalidade essencial.

As diretrizes conceituais propostas emergem da síntese dessas experiências diversas, oferecendo roteiro estruturado que minimiza riscos enquanto maximiza aprendizado organizacional. A abordagem faseada, iniciando com caracterização ambiental detalhada seguida por implementação piloto e expansão progressiva, demonstrou acelerar implementação total em 50% através de identificação precoce de desafios. A gestão sistemática de riscos técnicos, organizacionais e regulatórios, combinada com estratégias de sustentabilidade de longo prazo, estabelece base sólida para adoção bem-sucedida.

Os resultados obtidos demonstram que sistemas híbridos *LoRaWAN-Edge Computing* representam mais que evolução incremental - constituem transformação na abordagem de segurança e eficiência operacional em mineração subterrânea. A integração dessas tecnologias supera limitações individuais, criando sinergias que amplificam capacidades de monitoramento inteligente e comunicação resiliente.

A capacidade documentada de manter funções críticas de segurança localmente enquanto preserva supervisão global quando conectividade está disponível oferece equilíbrio entre autonomia operacional e integração sistêmica.

A viabilidade técnica e econômica estabelecida, combinada com benefícios quantificáveis em segurança e eficiência, posiciona esses sistemas como solução promissora para modernização do setor mineral. A tecnologia alcançou maturidade necessária, custos tornaram-se acessíveis e pressões regulatórias demandam evolução dos paradigmas tradicionais.

O valor dessa transformação tecnológica reside na capacidade de prevenir fatalidades e melhorar condições de trabalho, aspecto que transcende considerações econômicas e representa contribuição para sustentabilidade e responsabilidade social da indústria de mineração.

Como trabalho futuro, sugere-se o desenvolvimento e teste de protótipo *LoRa* em ambiente real de mineração subterrânea. O trabalho de Santos (2020) demonstrou viabilidade técnica utilizando Wi-Fi, mas a migração para *LoRa* expandiria significativamente o alcance de comunicação, eliminaria a dependência de infraestrutura existente e reduziria drasticamente o consumo energético.

Testes práticos em galerias subterrâneas validariam experimentalmente as vantagens de penetração das frequências sub-GHz e confirmariam a eficácia do processamento local para detecção de condições críticas. A integração posterior com 5G permitiria transmissão de arquivos multimídia para inspeção visual remota, criando arquitetura que combina eficiência energética do *LoRa* para sensoriamento contínuo com capacidade de transmissão de imagens e vídeos quando conectividade de alta velocidade estiver disponível.

Adicionalmente, a integração com tecnologias emergentes como inteligência artificial embarcada e *blockchain* para rastreabilidade de dados críticos de segurança representam frentes promissoras de desenvolvimento futuro que podem amplificar ainda mais as capacidades dos sistemas híbridos investigados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADELANTADO, F. et al. Understanding the limits of LoRaWAN. **CoRR**, v. abs/1607.08011, 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. **Resolução nº 680, de 27 de junho de 2017**. Aprova o Regulamento sobre Equipamentos de Radiocomunicação de Radiação Restrita. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 29 jun. 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/anatel/pt-br/regulado/radiofrequencia/radiacao-restrita>. Acesso em: 30 jul. 2025.

AUGUSTIN, A. et al. A study of LoRa: Long range & low power networks for the Internet of things. **Sensors**, v. 16, n. 9, p. 1466, 2016.

AUSTRALIAN COMMUNICATIONS AND MEDIA AUTHORITY. **Radio communications (Low Interference Potential Devices) Class Licence 2015**. Canberra: ACMA, 2015. Disponível em: <https://www.acma.gov.au/licences/low-interference-potential-devices-lipd-class-licence>. Acesso em: 30 jul. 2025.

BARAZA, X.; RODRÍGUEZ, R.; RUPEREZ, E. Statistical analysis of the severity of occupational accidents in the mining sector. **Journal of Safety Research**, v. 86, p. 381-388, 2023.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora NR-15: Atividades e Operações Insalubres**. Portaria SEPRT nº 6.734, de 09 de março de 2020. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 11 mar. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/aceso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/normas-regulamentadora/normas-regulamentadoras-vigentes/norma-regulamentadora-no-15-nr-15>. Acesso em: 30 jul. 2025.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora NR-22: Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração**. Portaria MTE nº 225, de 29 de janeiro de 2024. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 30 jan. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/aceso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/normas-regulamentadora/normas-regulamentadoras-vigentes/norma-regulamentadora-no-22-nr-22>. Acesso em: 30 jul. 2025.

CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION. **Criteria for a Recommended Standard: Occupational Exposure to Carbon Monoxide**. DHHS (NIOSH) Publication No. 73-11000. Cincinnati: U.S. Department of Health and Human Services, 2009.

CHENG, J. et al. A novel edge computing architecture for intelligent coal mining system. **Wireless Networks**, v. 28, n. 2, p. 665-678, 2022.

COAL MINE REGULATIONS. **Coal Mines Regulations 2017**. New Delhi: Ministry of Labour & Employment, Government of India, Directorate General of Mines Safety, 2017.

DI RENZONE, G. et al. LoRaWAN underground to aboveground data transmission performances for different soil compositions. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 70, p. 1-13, 2021.

EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE. **ETSI EN 300 220: Short Range Devices (SRD) operating in the frequency range 25 MHz to 1 000 MHz**. Sophia Antipolis: ETSI, 2012. Disponível em: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300200_300299/30022001/03.01.01_60/en_30022001v030101p.pdf. Acesso em: 30 jul. 2025.

FANG, L. et al. A mobile edge computing architecture for safety in mining industry. In: IEEE SMARTWORLD, UBIQUITOUS INTELLIGENCE & COMPUTING, 2019, Leicester. **Proceedings...** Leicester: IEEE, 2019. p. 1494-1498.

FEDERAL COMMUNICATIONS COMMISSION. **CFR Title 47 Part 15: Radio Frequency Devices**. Washington: FCC, 2020. Disponível em: <https://www.ecfr.gov/current/title-47/chapter-I/subchapter-A/part-15>. Acesso em: 30 jul. 2025.

KUMAR, P. P.; PAUL, P. S.; ANANDA, M. Development of LoRa communication system for effective transmission of data from underground coal mines. **Processes**, v. 11, n. 6, p. 1691, 2023.

LAVRIC, A.; POPA, V. Internet of Things and LoRaWAN Low-Power Wide-Area Networks: a survey. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SIGNALS, CIRCUITS AND SYSTEMS, 2017, Iasi. **Proceedings...** Iasi: IEEE, 2017. p. 1-5.

LIANDO, J. C. et al. Known and unknown facts of LoRa: experiences from a large-scale measurement study. **ACM Transactions on Sensor Networks**, v. 15, n. 2, p. 1-35, 2019.

LIU, X. et al. Edge computing for data anomaly detection of multi-sensors in underground mining. **Electronics**, v. 10, n. 3, p. 302, 2021.

LORA ALLIANCE. **LoRaWAN Specification V1.0.2**. 2016. Disponível em: <https://www.lora-alliance.org/>. Acesso em: 2025.

LORA ALLIANCE. **LoRaWAN L2 1.0.4 Specification**. Fremont: LoRa Alliance Technical Committee, 2020.

MEDINA, F. et al. Deploying IIoT systems for long-term planning in underground mining: a focus on the monitoring of explosive atmospheres. **Applied Sciences**, v. 14, n. 3, p. 1116, 2024.

MEKKI, K. et al. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. **ICT Express**, v. 5, n. 1, p. 1-7, mar. 2019.

MOLANO ORTIZ, F. **Análise de desempenho de uma rede sem-fio de baixa potência e longo alcance para a internet das coisas**. 2018. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

MUSONDA, S. K. et al. Reliability of LoRaWAN communications in mining environments: a survey on challenges and design requirements. **Journal of Sensor and Actuator Networks**, v. 13, n. 1, p. 16, 2024.

RAZA, U.; KULKARNI, P.; SOORIYABANDARA, M. Low power wide area networks: an overview. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 19, n. 2, p. 855-873, 2017.

SADEGHI, S.; SOLTANMOHAMMADLOU, N.; NASIRZADEH, F. Applications of wireless sensor networks to improve occupational safety and health in underground mines. **Journal of Safety Research**, v. 83, p. 8-25, 2022.

SANTOS, R. C. P. **Desenvolvimento de soluções de baixo custo para monitoramento de minas subterrâneas e de laboratório de ventilação utilizando o conceito de Internet das Coisas**. 2020. 186 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

SANTOS, R. C. P. et al. Development of a low-cost device for monitoring ventilation parameters (temperature, humidity and pressure) in underground environments to increase operational safety using IoT. **Mining**, v. 2, n. 4, p. 746-756, 2022.

SANTOS, R. C. P.; SILVA, J. M. Tendências tecnológicas em ventilação de mina subterrânea. **In The Mine**, Belo Horizonte, ano XVIII, n. 114, p. 28-31, jan./fev. 2025.

SILVA, C. E. **Uso de dispositivos vestíveis tecnológicos na mineração**. 2022. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

SILVA, C. E.; SILVA, J. M.; SANTOS, R. C. P. Uso de dispositivos vestíveis tecnológicos na mineração. **In The Mine**, Belo Horizonte, ano XVIII, n. 114, p. 18-21, jan./fev. 2025.

SITTÓN-CANDANEDO, I. et al. Edge computing architectures in Industry 4.0: a general survey and comparison. In: MARTÍNEZ ÁLVAREZ, F. et al. (ed.). **14th International Conference on Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications (SOCO 2019)**. Cham: Springer, 2020. p. 121-131. (Advances in Intelligent Systems and Computing, v. 950).

THEISSEN, M. et al. Use-case-oriented evaluation of wireless communication technologies for advanced underground mining operations. **Sensors**, v. 23, n. 7, p. 3537, 2023.

U.S. BUREAU OF LABOR STATISTICS. Mining fatalities rose 21.8 percent from 2020 to 2021. **The Economics Daily**, Washington, 28 abr. 2023. Disponível em: <https://www.bls.gov/opub/ted/2023/mining-fatalities-rose-21-8-percent-from-2020-to-2021.htm>. Acesso em: 30 jul. 2025.

VILLARIM, A. W. R. **Estudo do desempenho da transmissão subterrânea via LoRa para o monitoramento de sistemas subterrâneos visando aplicações em sistemas de distribuição de água**. 2023. 81 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2023.

VILLARIM, A. W. R. et al. Análise experimental da comunicação LoRa em ambientes subterrâneos para aplicações IoT. **Revista Brasileira de Computação Aplicada**, v. 15, n. 3, p. 38-47, 2023.

ZHAO, G. et al. Optimizing energy efficiency of LoRaWAN-based wireless underground sensor networks: a multi-agent reinforcement learning approach. **Internet of Things**, v. 23, p. 100849, 2023.