Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
CECAU - Colegiado do Curso de
Engenharia de Controle e Automação

Letícia Pedroso Colombo

Comparativo Entre Meios de Comunicação de Dados Para Automação de Instrumentos no Monitoramento de Barragens

Ouro Preto, 2025

Letícia Pedroso Colombo

Comparativo Entre Meios de Comunicação de Dados Para Automação de Instrumentos no Monitoramento de Barragens

Trabalho apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro(a) de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Agnaldo J. R. Reis

Ouro Preto
2025

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

FOLHA DE APROVAÇÃO

Letícia Pedroso Colombo

Comparativo Entre Meios de Comunicação de Dados Para Automação de Instrumentos no Monitoramento de Barragens

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

Aprovada em 29 de agosto de 2025

Membros da banca

Doutor - Agnaldo José da Rocha Reis - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Doutor - André Luís Barroso Almeida - (Instituto Federal de Minas Gerais - Campus Ouro Preto)
Doutora - Adrielle de Carvalho Santana - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Agnaldo José da Rocha Reis, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 10/09/2025

Documento assinado eletronicamente por **Agnaldo Jose da Rocha Reis**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/09/2025, às 12:59, 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 **0976331** e o código CRC **2C26FB81**.

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

Agradecimentos

Agradeço a Deus, à minha família e aos meus amigos, cujo apoio tornou possível chegar até aqui.

À Escola de Minas, à Universidade Federal de Ouro Preto e a todos os professores, pelos ensinamentos e oportunidades.

À Fugro, onde pude colocar em prática o conhecimento presente neste trabalho.

Resumo

Até o século XV, o rejeito proveniente do beneficiamento do minério tinha um impacto considerado desprezível. Contudo, após conflitos com agricultores, causados pelo descarte de rejeitos em águas utilizadas na lavoura, foram buscados meios de realizar esse descarte de forma mais segura, utilizando majoritariamente barragens de rejeito. Indesejáveis mas factíveis, acidentes com barragens podem comprometer a população dos arredores, trabalhadores e o meio ambiente e, dependendo das suas severidades, de suas consequências e da legislação imposta sobre o rejeito, a instrumentação e o monitoramento das barragens tornaram-se obrigatórias. Por alguns anos, esse monitoramento foi feito de forma manual, mas, com o passar do tempo, surgiu a necessidade de automatizar essa tarefa, uma vez que leituras manuais podem apresentar falhas humanas e são mais demoradas. Para tanto, são utilizados alguns instrumentos geotécnicos, como piezômetros, medidores de nível d'água, medidores de vazão, inclinômetros, pluviômetros, acelerômetros e radares; e os dispositivos para a automação como *dataloggers, gateways*, RTUs e softwares de monitoramento. Nesse contexto, existem diversas formas de estabelecer uma comunicação entre os dispositivos concentradores de dados e os servidores ou Centros de Monitoramento Geotécnico (CMG), tais como: redes *Wi-fi, ZigBee, Bluetooth Low Energy*, Internet via modem celular, Internet Satelital e Ethernet. Desse modo, apresentam-se neste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) elementos comparativos de tais meios de comunicação de dados, levando-se em conta parâmetros tais como: alcance/cobertura, confiabilidade da comunicação, velocidade, consumo de energia, custos e tempo de implementação. A comparação foi feita baseada em uma Revisão Bibliográfica das tecnologias a serem estudadas e comparadas entre si. Desse posse dessa informação, a tarefa de escolha de meios de comunicação para equipamentos utilizados no monitoramento de barragens pode ser beneficiada. Como resultados, optou-se pela Ethernet como a primeira opção para um sistema de monitoramento de barragens, devido a sua alta confiabilidade de transmissão de dados (por ser cabeada, especialmente quando usada a fibra óptica), bom alcance, baixa latência e baixo custo a longo prazo, tendo como desvantagem apenas o grande tempo de implementação da rede. Além disso, concluiu-se que os critérios de escolha da tecnologia devem levar em consideração não somente as características da rede em si, mas também o posicionamento estratégico e econômico da empresa responsável pela barragem.

Palavras-chaves: Meios de comunicação de dados. Monitoramento automático de barragens de rejeito. Automação

Abstract

Until the 15th century, the impact of waste from ore processing was considered negligible. However, after conflicts with farmers caused by the disposal of tailings in waters used for irrigation, measures were sought to carry out this disposal more safely, primarily through the use of tailings dams. Undesirable but feasible, dam accidents can endanger the surrounding population, workers, and the environment. Depending on their severity, consequences, and the legislation imposed on tailings, dam instrumentation and monitoring became mandatory. For some years, this monitoring was done manually, but over time, the need arose to automate this task, as manual readings can be subject to human error and are more time-consuming. To this end, geotechnical instruments such as piezometers, water level gauges, flow meters, inclinometers, rain gauges, accelerometers, and radars are used, as well as automation devices such as dataloggers, gateways, RTUs, and monitoring software. In this context, there are several ways to establish communication between data concentrator devices and servers or Geotechnical Monitoring Centers (GMCs), such as Wi-Fi, ZigBee, Bluetooth Low Energy, cellular modem internet, satellite internet, and Ethernet. Therefore, this Final Project presents comparative elements of these data communication methods, taking into account parameters such as range/coverage, communication reliability, speed, energy consumption, costs, and implementation time. This information can be used to improve the selection of communication methods for dam monitoring equipment. The comparison was made based on a literature review of the technologies to be studied and compared with each other. With this information in hand, the task of choosing communication means for equipment used in dam monitoring can be facilitated. As a result, Ethernet was chosen as the first option for a dam monitoring system, due to its high reliability in data transmission (being wired, especially when using fiber optics), good range, low latency, and low long-term cost, with the only disadvantage being the long time required for network implementation. Furthermore, it was concluded that the criteria for selecting the technology should take into account not only the characteristics of the network itself, but also the strategic and economic positioning of the company responsible for the dam.

Key-words: Data communication methods. Automatic monitoring of tailings dams. Automation

Lista de ilustrações

Figura 1 – Sobrevoo da área atingida pelo rompimento da barragem em Brumadinho (MG) . . . 13
Figura 2 – Sistema WorldSensing . . . 15
Figura 3 – Rompimento da barragem em Brumadinho (MG) . . . 19
Figura 4 – Barragens em nível de alerta ou emergência . . . 20
Figura 5 – Estrutura de uma barragem à montante . . . 21
Figura 6 – Alteamentos de uma barragem à montante . . . 21
Figura 7 – Estrutura de uma barragem à jusante . . . 22
Figura 8 – Alteamento de uma barragem à jusante . . . 22
Figura 9 – Estrutura e alteamento de uma barragem de linha de centro . . . 23
Figura 10 – Piezômetro de corda vibrante . . . 26
Figura 11 – Medidor de nível d'água . . . 27
Figura 12 – Medidor de vazão do tipo Calha Parshall . . . 28
Figura 13 – Inclinômetro *In Place* . . . 29
Figura 14 – Pluviômetro Ville de Paris . . . 29
Figura 15 – Acelerômetro para medição de vibração . . . 30
Figura 16 – Radar RGR-Velox . . . 31
Figura 17 – Datalogger CR310 . . . 33
Figura 18 – Gateway Cloud . . . 33
Figura 19 – RTU L900 . . . 34
Figura 20 – Protocolo CSMA/CA aplicado no *Wi-fi* . . . 36
Figura 21 – Topologias de rede do padrão IEEE 802.15.4 . . . 37
Figura 22 – Módulo BLE . . . 38
Figura 23 – Starlink . . . 41

Lista de tabelas

Tabela 1 – Comparativo entre as gerações da família 802.11 36
Tabela 2 – Comparativo de alcance e cobertura 45
Tabela 3 – Comparativo de confiabilidade da comunicação 47
Tabela 4 – Comparativo de velocidade 48
Tabela 5 – Comparativo de consumo energético 49
Tabela 6 – Comparativo de custos 50
Tabela 7 – Comparativo de tempo de implementação 51
Tabela 8 – Comparativo total 52

Lista de abreviaturas e siglas

ADAS	Automated Data Aquisition System
ANA	Agência Nacional de Águas
ANM	Agência Nacional de Mineração
BLE	Bluetooth Low Energy
CGG	Comissão Geográfica e Geológica de São Paulo
CMG	Centro de Monitoramento Geotécnico
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CREA	Conselho Regional de Engenharia e Agronomia
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
DI	Downlink Indicator
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DPA	Dano Potencial Associado
FFD	Full Function Devices
FNMA	Fundo Nacional do Meio Ambiente
GBSB	Guia Básico de Segurança das Barragens
GMS	Global System for Mobile Communications
GTS	Guaranteed Time Slot
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISP	Internet Service Provider
LAN	Local Area Network
LTE	Long Term Evolution
MIMO	Multiple Input Multiple Output
OSI	Open Systems Interconnection

PAE	Plano de Ação Emergencial
PAEBM	Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
PSB	Plano de Segurança de Barragens
RFD	Reduced Function Devices
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental
RTU	Remote Terminal Unity
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SIGBM	Sistema de Gestão de Segurança de Barragens de Mineração
TCP/IP	Transport Control Protocol/Internet Protocol
UDP/IP	User Datagram Protocol/Internet Protocol
UI	Uplink Indicator
UTP	Unshielded Twisted Pair
UTR	Unidade Terminal Remota
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Tecnologias de rede sem fio
WPAN	Wireless Personal Area Network

Sumário

1 INTRODUÇÃO 12
1.1 Justificativas e Relevância 16
1.2 Objetivos 16
1.3 Metodologia 16
1.4 Organização e Estrutura 16

2 REVISÃO DE LITERATURA 18
2.1 História da Mineração em território brasileiro e contenção dos danos causados pelo rejeito do beneficiamento do minério 18
2.2 Como funcionam as barragens de rejeito? 20
2.2.1 Método à montante 21
2.2.2 Método à jusante 22
2.2.3 Método de linha de centro 23
2.3 Quanto à legislação brasileira 23
2.4 Instrumentação geotécnica de barragens de rejeito 24
2.4.1 Piezômetros 26
2.4.2 Medidores de Nível D'água 27
2.4.3 Medidores de Vazão 27
2.4.4 Inclinômetros 28
2.4.5 Pluviômetros 29
2.4.6 Acelerômetros 30
2.4.7 Radares 30
2.5 Sistemas de monitoramento de barragens de rejeito 31
2.5.1 *Dataloggers* 32
2.5.2 *Gateways* 33
2.5.3 Unidade Terminal Remota 34
2.6 Meios de comunicação 34
2.6.1 *Wi-fi* 34
2.6.2 ZigBee e Bluetooth Low Energy 36
2.6.3 Internet via modem celular 38
2.6.4 Internet Satelital 39
2.6.5 Ethernet 41

3 DESENVOLVIMENTO 44
3.1 Alcance e cobertura 45
3.2 Confiabilidade da comunicação 45

3.3 Velocidade 47
3.4 Consumo de energia 48
3.5 Custos 48
3.6 Tempo de implementação 50
3.7 Tabela comparativa 51

4 RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS 53

Referências 55

1 Introdução

A história da mineração no território latino-americano surge no século XV como responsável por grande parte das economias espanhola e portuguesa. No período de 1493 a 1850, o Brasil chegou a alcançar uma produção de ouro equivalente a metade do restante das Américas. A exploração na região de Minas Gerais e no restante do país passou por uma grande ascensão nos primeiros séculos de atividade. O "Ciclo do Ouro", por exemplo, foi um momento marcante na história, quando as riquezas de Portugal superaram as da Espanha (FIGUEIROA, 1997).

Até o século XV, não havia preocupação da parte da indústria mineradora quanto aos rejeitos gerados pelo beneficiamento do minério. Normalmente, o descarte era feito em rios e cursos d'água, e o impacto ambiental era considerado desprezível. Posteriormente, essa negligência causou conflitos entre os mineradores e agricultores, uma vez que os primeiros estavam poluindo as fontes de irrigação de lavoura dos segundos (JUNIOR; MOREIRA; HEINECK, 2018).

Com o declínio da atividade mineradora em 1750, os portugueses buscaram fomentar cada vez mais incentivos para buscar um novo estímulo para a atividade, incluindo, em 1886, a criação da Escola de Minas, em Ouro Preto, Minas Gerais (DOMINGUES, 2022). Desde então, a mineração seguiu como um dos maiores potenciais econômicos do país.

No século XIX, surgiram as primeiras barragens de rejeito que, na época, não eram bem projetadas e praticamente não resistiam à chuva. A massa rejeitada passou a ser majoritariamente descartada dessa forma, e este meio de descarte ainda permanece como o principal até os dias de hoje, porém, ainda se trata de uma grande questão para os ambientalistas e para a indústria. Para Soares (2010), a disposição dos rejeitos em barragens é um contratempo industrial.

Entre os anos de 1930 e 1940, foi possível observar a utilização de instrumentos mecânicos e hidráulicos para o monitoramento das barragens, sendo esse considerado o surgimento da instrumentação geotécnica, com o objetivo de observar, detectar e caracterizar o comportamento da barragem e de suas estruturas auxiliares (MACHADO, 2007).

Ao longo das décadas, diversos rompimentos de barragens ocorreram no Brasil, causando sérios impactos sociais, econômicos e ambientais. Entre eles, podem ser citados o rompimento da Barragem de Cataguases, em Minas Gerais, em 2003, e da Barragem de Miraí, também em Minas Gerais, em 2007, ambos responsáveis por inundações e contaminações de cursos d'água que afetaram diretamente a população e o meio ambiente (CEDOM, 2025).

Nesse sentido, o monitoramento das barragens se tornou essencial para a segurança da atividade. Em 2010, foi criada a Política Nacional de Segurança das Barragens - PNSB (Lei nº 12.334/2010), que contempla especificações necessárias para a gestão adequada de riscos de uma barragem (BRASIL, 2010). Os acidentes que já vinham acontecendo sinalizaram a importância de um monitoramento não somente orientado para a segurança estrutural e hidráulico-operacional, mas também para um controle de segurança a longo prazo, que garantisse, inclusive, a segurança da população em potencial de ser atingida (SANTOS, 2022).

Ainda assim, acidentes graves continuaram acontecendo. A título de exemplo, o acidente de Brumadinho, que aconteceu em 2019, Barragem I, na mina do Córrego do Feijão, teve um severo impacto na região: contaminação drástica do meio ambiente, distúrbios hidrológicos, mudanças na cobertura da terra, problemas socioeconômicos e, principalmente, as perdas humanas por mortes e por comprometimento da saúde e bem-estar físico das populações atingidas (PEREIRA; BARROS CRUZA; GUIMARÃES, 2019).

Figura 1 – Sobrevoo da área atingida pelo rompimento da barragem em Brumadinho (MG). Fonte: Nóbrega (2019)

O monitoramento das barragens era feito, até o início da década de 90, de forma manual, isto é, os sensores eram instalados e lidos pelos próprios operários. Esse método, além de ser mais demorado para ser feito, gera uma cadência de erros relativamente grande, uma vez que o ser humano é falho e que fatores externos influenciam significativamente nessa leitura. Por exemplo, se no momento da medição o operário estiver sonolento, pode

ser que haja algum erro na leitura. Ou, ainda, se estiver com algum problema pessoal naquele dia e não estiver bem psicologicamente, se estiver mal de saúde, medicado, se trabalhar com troca de turnos, dentre muitas outras coisas que podem influenciar no seu trabalho (BASTOS; AFONSO, 2020).

Um outro problema relacionado à leitura manual é a velocidade com que as informações chegam a quem toma as decisões sobre a barragem. Quando a leitura é feita de forma manual, há a necessidade de o técnico estar em seu horário de trabalho e, ainda, se deslocar até o local da barragem para realizar a leitura; anotar os resultados em uma folha de papel ou em uma planilha e só então compartilhar os dados com o setor administrativo (FONSECA et al., 2022). Dessa forma, muitas informações sobre os sensores e, consequentemente sobre a barragem, são perdidas. Se acontecer alguma leitura discrepante à noite, por exemplo, os funcionários saberão apenas no período da manhã, a não ser que algo mais grave aconteça, como um rompimento. No final da década de 90, com o avanço da tecnologia e da automação, começaram a surgir os primeiros instrumentos que possibilitaram a automação da instrumentação de grandes barragens. Com a chegada dos Sistemas Automatizados de Aquisição de Dados – ADAS (*Automated Data Aquisition System*), ainda no final do século XX, e o surgimento da instrumentação por fibra óptica, no início do século XXI, o monitoramento das barragens foi se tornando cada vez mais automático. (MACHADO, 2007).

Atualmente, existem diversos instrumentos que são utilizados para tal monitoramento. Alguns deles são: Piezômetros (*standpipe*, pneumáticos, hidráulicos, elétricos e de corda vibrante); Medidores de Nível D'água, Medidores de Vazão, Inclinômetros, Pluviômetros, Acelerômetros e Radares Interferométricos e; e o sistema de automação, composto por *Dataloggers, Gateways*, (SILVA, 2019) e outros instrumentos auxiliares que serão mais bem descritos no Capítulo 2.

Os sensores são instalados no local da barragem e se comunicam com *dataloggers*, que são, basicamente, registradores de dados. Algumas vezes, a depender do tipo de sensor, essa comunicação não é direta, havendo a necessidade de utilizar um outro dispositivo que seja compatível com o tipo do sensor, conseguindo se comunicar com os *dataloggers* principais e, assim, fazendo a transmissão dos dados dos sensores. Uma vez que os registradores de dados já possuem informações em sua memória, eles se comunicam com *gateways*, que são responsáveis por traduzir protocolos de comunicação entre redes ou sistemas e, ainda, concentrar os dados dos *dataloggers*. Eles também podem ser Unidades Terminais Remotas, ou seja, RTUs. Sua função na coleta dos dados é concentrar as leituras enviadas pelos *dataloggers* ou sensores aos quais estão conectadas, respeitando as configurações de ambos os equipamentos. Uma vez que o *gateway* já possui leituras em seu armazenamento, esses dados são transmitidos para o *software* do próprio equipamento ou de um terceiro, onde é possível configurá-lo e acessar os dados de forma bruta, e em seguida, convertê-los em

unidades de engenharia. Alguns *gateways* conseguem fazer essa transmissão de dados de 5 em 5 segundos, por exemplo, gerando um monitoramento em tempo quase real. Na Figura 2, é possível observar o esquemático de um sistema como o descrito pela *WorldSensing*, uma fabricante de *dataloggers*, *gateways* e outros equipamentos de monitoramento.

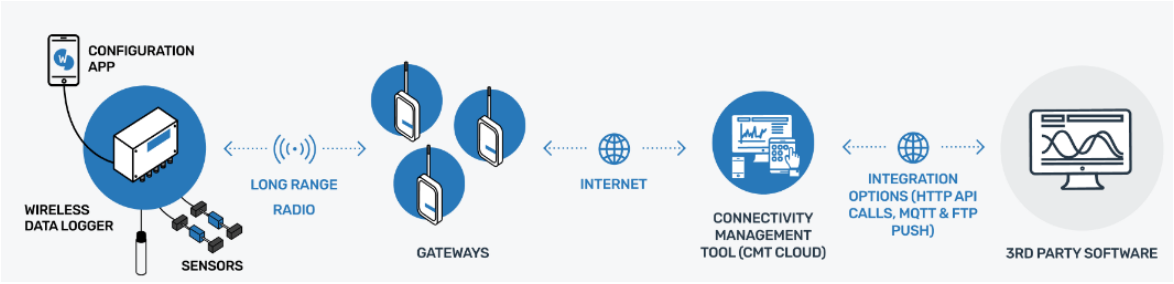

Figura 2 – Esquemático de sistema de aquisição de dados automático para monitoramento da WorldSensing. Fonte: WorldSensing (2024b)

A medição automática de sensores em barragens trouxe diversas vantagens, como: a segurança, já que é possível saber quais são as estatísticas das barragens em tempo quase real (alguns *gateways* podem, inclusive, enviar notificações por *e-mail* caso algum *datalogger* pare de funcionar ou alguma leitura esteja destoante do esperado); melhoria na documentação dos dados, pois, em algumas empresas, o armazenamento dos dados é feito de forma manual em folhas de papel, o que além de ser suscetível a falhas e a perdas de informação, dificulta o compartilhamento dos resultados com a equipe; e avanço na análise crítica dos dados, com a utilização de tecnologias, gráficos e linhas de tendência, possibilitando realizar comparações e correlações entre as medições de forma mais automática (VELOSO et al., 2007).

Como visto, o monitoramento automático se tornou um dos maiores auxiliares para as mineradoras e para a segurança de suas operações. Mas, dentre tantos equipamentos utilizados nesse monitoramento, como é feita sua comunicação? Esse é um dos principais pontos quando se trata do sistema de monitoramento em si, já que, se existe falha de comunicação entre os dispositivos, não há envio dos dados para o Centro de Monitoramento.

Existem diversas formas em que os dispositivos utilizados em campo podem operar. Além de várias topologias, isto é, maneiras em que os instrumentos podem ser dispostos, como *mesh* (ou malha), anel, estrela, dentre outras, sua comunicação pode variar a depender do local de instalação, condições adversas, dentre outras razões. Neste trabalho, serão exploradas as principais formas de comunicação de equipamentos de monitoramento automático de barragens, especialmente a comunicação entre *gateways* e servidores/CMG, e, ainda, estudado como essa forma de comunicação pode interferir no sistema de aquisição de dados, considerando alcance/cobertura, confiabilidade da comunicação, velocidade, consumo de energia, custos e tempo de implementação.

1.1 Justificativas e Relevância

Dado o cenário de diversos acidentes que aconteceram devido a uma provável falha no monitoramento de barragens ou até mesmo devido a falta dele, e partindo do ponto que um monitoramento automático é mais eficaz que o manual, o estudo de meios de comunicação entre dispositivos de monitoramento de barragens se faz necessário.

1.2 Objetivos

Geral

Realizar um comparativo entre as diversas formas de comunicação entre os dispositivos utilizados para o monitoramento automático de barragens, especialmente na comunicação entre *gateways* e servidores/Centro de Monitoramento Geotécnico (CMG), quanto os quesitos alcance/cobertura, confiabilidade da comunicação, velocidade, consumo de energia, custos e tempo de implementação.

Específicos

- Estudar os conceitos de redes *Wi-fi, ZigBee, Bluetooth Low Energy*, Internet via modem celular, Internet Satelital e Ethernet, que são alguns dos principais meios de comunicação entre os dispositivos de monitoramento automático de barragens;
- Entender e exemplificar a influência de cada protocolo de comunicação na transmissão dos dados e como essa tecnologia é definida a depender do local em que será instalada e das condições adversas do ambiente.

1.3 Metodologia

A Metodologia do presente trabalho será baseada em estudar os conceitos propostos nos objetivos específicos por meio de uma Revisão de Literatura. Em seguida, utilizar os resultados das pesquisas realizadas e o conhecimento adquirido durante a graduação em Engenharia de Controle e Automação para realizar um comparativo entre os métodos estudados com o intuito de atender ao objetivo geral proposto.

1.4 Organização e Estrutura

Este documento está dividido nos capítulos descritos a seguir. No Capítulo 2 é apresentada a Revisão de Literatura. São estudados elementos da história da mineração no Brasil e da contenção de danos causados pelo rejeito do beneficiamento do minério; o

funcionamento das barragens de rejeito; a legislação brasileira em relação ao descarte da massa rejeitada; a instrumentação geotécnica utilizada no monitoramento de barragens (inclusive para sistemas automáticos) e, por fim, os principais tipos de meios de comunicação utilizados nesse contexto. Já no Capítulo 3, Desenvolvimento, é feito o comparativo entre esses meios de comunicação, conforme estabelecido nos objetivos do trabalho. Por fim, no Capítulo 4 são apresentados os resultados da comparação feita e as considerações finais.

2 Revisão de literatura

Com o intuito de cumprir os objetivos geral e específicos propostos para essa monografia, foram estudados alguns artigos e trabalhos desenvolvidos sobre o tema.

2.1 História da Mineração em território brasileiro e contenção dos danos causados pelo rejeito do beneficiamento do minério

A história da mineração brasileira se inicia no século XV, segundo Figueiroa (1997), com as primeiras notícias de descobrimento do ouro na região de Ouro Preto, antiga Vila Rica, estendendo-se aos estados da Bahia e Goiás alguns anos depois, na década de 1720. Assim, o enriquecimento da produção mineral é seguido pela descoberta do diamante, inicialmente também em Minas Gerais, no Tejuco (atual Diamantina). O crescimento da indústria mineradora no território foi tal que, no período de 1493 a 1850, o Brasil chegou a alcançar uma produção de ouro equivalente a metade do restante das Américas. A atividade mineira foi, durante muitos séculos, fundamental para a economia do antigo sistema colonial empregado em Portugal e na Espanha. O "Ciclo do Ouro", marcado pela ultrapassagem de volume explorado pela coroa portuguesa sobre a Espanha, foi um evento de papel fundamental para a ascensão do sistema capitalista na Europa (DOMINGUES, 2022).

Até o século XV, não havia preocupações em relação ao rejeito da mineração: seu impacto no meio ambiente era considerado desprezível, ainda que fossem responsáveis por contaminar rios e cursos d'água. Mesmo com o avanço na técnica de mineração de materiais com baixo teor mineral (o que aumentou significativamente a quantidade de rejeitos), as práticas de disposição de rejeitos permaneceram as mesmas, ou seja, o meio ambiente continuava sendo contaminado via recursos hídricos (JUNIOR; MOREIRA; HEINECK, 2018).

Contudo, com o decaimento da atividade mineradora em 1750, a agricultura voltou a ser considerada a única verdadeira riqueza, se fortalecendo no Brasil e em Portugal. Foi desde esse período que a coroa portuguesa buscou estimular a atividade mineradora, fomentando iniciativas como a Comissão Geológica do Brasil, em 1875; a Escola de Minas em Ouro Preto, em 1886 e a Comissão Geográfica e Geológica de São Paulo (CGG), no mesmo ano, dentre outras escolas com o objetivo de pesquisar e explorar os recursos brasileiros (DOMINGUES, 2022).

As primeiras barragens, construídas por volta do século XIX, não eram bem projetadas e operadas, devido à falta de profissionais nessas funções e, na maioria das vezes, não permaneciam estáveis durante o período chuvoso. Ainda, no início do século

XX, conflitos começaram a surgir entre mineradores e agricultores: os primeiros eram responsáveis pela contaminação da água de poços de irrigação que eram utilizados nas lavouras. Foi nesse momento na história, por volta do final do século XX, que as primeiras legislações relacionadas ao controle e gerenciamento do rejeito proveniente da mineração começaram a ser concebidas. Com o avanço tecnológico ao longo dos anos, novas técnicas de contenção de rejeitos mais seguras foram sendo construídas, alguns métodos sendo utilizados até os dias atuais, porém, de forma mais mecanizada (JUNIOR; MOREIRA; HEINECK, 2018).

Entretanto, as barragens atuais, por mais que bem projetadas, ainda são suscetíveis a falhas. Ao longo dos anos, diversas barragens sofreram rupturas que resultaram em graves acidentes. Esses incidentes foram frequentemente causados por falhas estruturais que levaram à liquefação ou ao escoamento dos rejeitos armazenados (RODRIGUES; OLIVEIRA NASCIMENTO, 2020). Um exemplo significativo foi o rompimento da Barragem I, na mina do Córrego do Feijão, em Brumadinho, no ano de 2019. Este desastre teve um grande impacto na região, incluindo a contaminação severa do meio ambiente, alterações nos recursos hídricos, modificações na cobertura do solo, e problemas socioeconômicos, além das trágicas perdas humanas e o comprometimento da saúde e bem-estar das populações afetadas (PEREIRA; BARROS CRUZA; GUIMARÃES, 2019). A Figura 3 mostra a vista aérea da destruição causada pelo rompimento da barragem em Brumadinho, MG.

Figura 3 – Vista aérea da destruição causada pelo rompimento da barragem da Vale em Brumadinho. Fonte:Mansur (2023).

Segundo a Agência Nacional de Mineração (ANM), (ANM, 2024), até 01/09/2024, existiam 934 barragens de mineração cadastradas no Sistema de Gestão de Segurança

de Barragens de Mineração – SIGBM, sendo que 94 delas estão em estado de alerta ou emergência declarada (Figura 4).

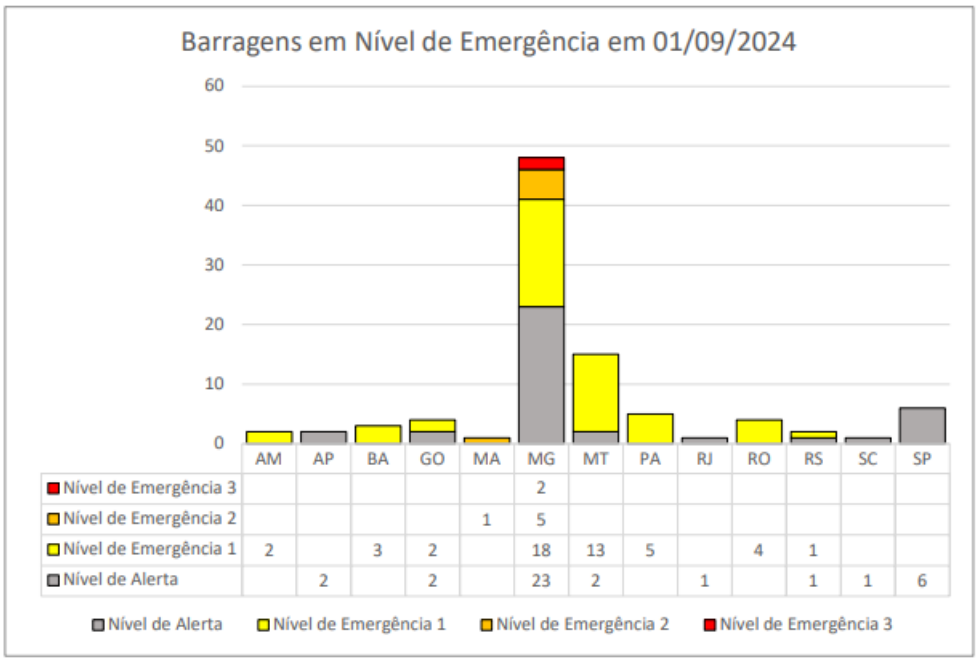

Figura 4 – Distribuição das barragens em nível de alerta ou emergência por estado em 01/09/2024. Fonte: ANM (2024).

É importante ressaltar que só se sabe de estados de alerta ou emergência devido ao monitoramento das barragens, hoje regulamentadas por lei, cujo histórico e situação atual podem ser analisados em seções futuras.

2.2 Como funcionam as barragens de rejeito?

Duarte (2008) define os rejeitos de mineração como resíduos resultantes dos processos de beneficiamento do minério, os quais são realizados com o intuito de extrair o bem material de interesse econômico, ou seja, o produto. O autor também diz que os rejeitos podem ser descartados de duas formas, sendo elas a granel, isto é, sendo transportados por caminhões ou correias transportadoras; ou na forma de polpa, onde o transporte é feito por tubulações. Quanto à sua disposição, o estudo afirma que os rejeitos podem ser dispostos em minas subterrâneas, em cavas exauridas de minas, em pilhas, pelo método de empilhamento a seco, por disposição em pasta e, por fim, em barragens de contenção de rejeitos.

Segundo Machado (2007), as barragens de rejeito são projetadas com um dique de partida com material impermeável e, sob ele, uma trincheira de vedação. O autor também explica o funcionamento da força de percolação, que é a força correspondente a transferência de energia da água para as partículas do solo quando há um movimento dessa

água. Essa é a força responsável pela instabilidade dos taludes de barragens, podendo causar o rompimento da estrutura.

O trabalho de Cardozo, Pimenta e Zingano (2016) apresenta os três principais métodos construtivos de uma barragem de rejeitos, sendo eles Método à Jusante, Método à Montante e Método da Linha de Centro, definidos com base em critérios técnicos da obra, como orçamento e quantidade inicial de rejeito.

2.2.1 Método à montante

É o método que consiste no alteamento do rejeito sempre à montante, isto é, no sentido em que a água corre em direção à nascente (rio acima). Também definido pela ANM como o método no qual os maciços se apoiam sobre os próprios rejeitos (ANM, 2019). A Figura 5 apresenta a construção inicial de uma barragem segundo esse método. Machado (2007), pontua que este método, apesar de ser o mais econômico a curto prazo, não é muito controlável devido ao seu método de construção e, por isso, apresenta maiores riscos de ruptura.

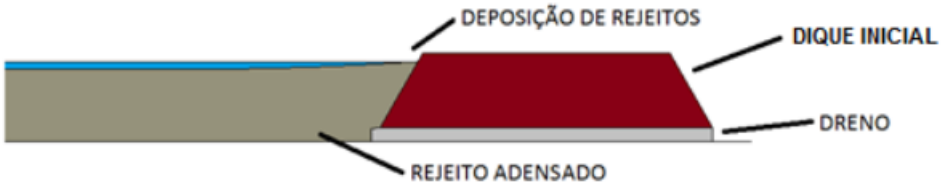

Figura 5 – Estrutura inicial de uma barragem à montante. Fonte: Cardozo, Pimenta e Zingano (2016).

A Figura 6 detalha como seriam os próximos alteamentos em uma barragem à montante.

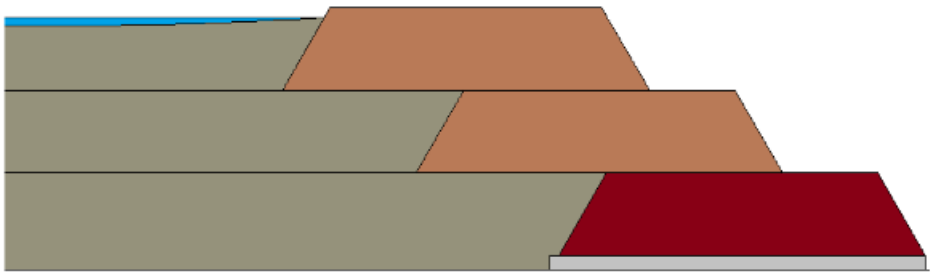

Figura 6 – Alteamentos posteriores em uma barragem à montante. Fonte:Cardozo, Pimenta e Zingano (2016).

2.2.2 Método à jusante

É o método que consiste no alteamento do rejeito sempre à jusante, isto é, no sentido em que a água corre em direção à foz (rio abaixo). Definido pela ANM (2019) como alteamento a jusante a partir do dique inicial, onde os maciços são construídos com material de empréstimo ou com o próprio rejeito. A Figura 7 apresenta o modelo de construção inicial de uma barragem segundo esse método. Machado (2007) afirma que esse é o método mais eficiente nos quesitos de controle do lançamento do rejeito e a compactação do alteamento, controlando também a força de percolação. Assim, apesar de ser um método mais seguro, necessita de um maior investimento, já que requer um maior volume de material (areia/lama), um sistema de drenagem e grandes quantidades de rejeito nas primeiras etapas, além de ocupar uma área territorial maior. Outro fator muito importante sobre esse método é o monitoramento: uma vez que o rejeito é disposto à jusante, há a necessidade de movimentar os instrumentos com frequência.

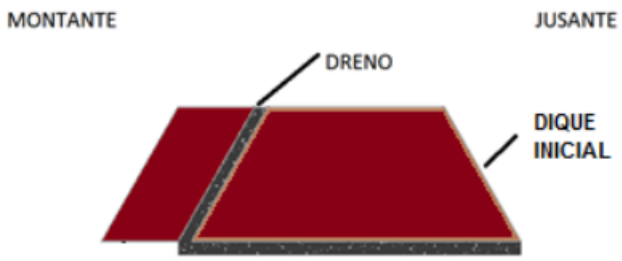

Figura 7 – Estrutura inicial de uma barragem à jusante. Fonte: Cardozo, Pimenta e Zingano (2016).

A Figura 8 detalha como seria os próximos alteamentos de uma barragem à jusante.

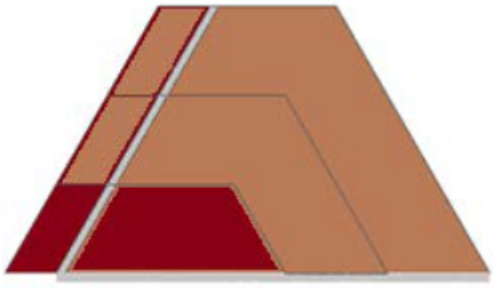

Figura 8 – Alteamentos posteriores de uma barragem à jusante. Fonte: Cardozo, Pimenta e Zingano (2016).

2.2.3 Método de linha de centro

É o método que consiste no alteamento do rejeito tanto à montante quanto à jusante, seguindo um eixo vertical (linha de centro). Segundo a ANM (2019), é o método em que o eixo da barragem se mantém alinhado com o eixo do dique de partida. Esse método procura balancear as vantagens e desvantagens dos métodos supracitados. A Figura 9 apresenta como é a estrutura e os alteamentos em uma barragem pelo método da Linha de Centro.

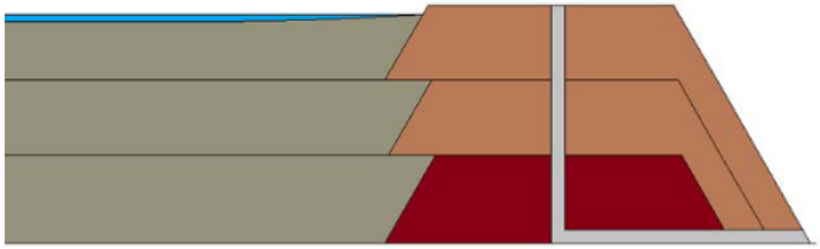

Figura 9 – Estrutura e alteamento de uma barragem de linha de centro. Fonte: Cardozo, Pimenta e Zingano (2016).

O método de construção da barragem é importante para entender os principais motivos que podem levar a um rompimento, vazamento ou outro acidente.

2.3 Quanto à legislação brasileira

Souza (2019) apresenta em sua monografia a evolução histórica legislativa brasileira e mineira em relação à disposição de rejeitos em barragens de mineração, com foco na ANM como órgão fiscalizador. O estudo afirma que as primeiras normas relacionadas ao impacto causado pelo rejeito mineral surgiram no ano de 1986, século XX, como também afirmam Junior, Moreira e Heineck (2018). Tais termos foram instituídos e publicados pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, obrigando apenas obras hidráulicas e para exploração de recursos hídricos a apresentarem o Relatório de Impacto Ambiental (RIMA). Porém, segundo Souza (2019), somente em 2001 foi instituída a primeira norma específica para barragens de rejeitos pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), a portaria DNPM n° 237, que exigia a construção de sistemas de drenagem para evitar a saturação dos rejeitos, estudos hidrológicos e geotécnicos como elementos pré-construtivos da barragem e a presença obrigatória de um profissional habilitado pelo Conselho Regional de Engenharia e Agronomia (CREA).

Em seguida, em 2006, foi criada a norma brasileira ABNT NBR 13.028/2006, que estabelece requisitos mínimos para a apresentação do projeto de barragens, considerando a disposição dos rejeitos de beneficiamento. Ainda, em 2010, foi aprovada a Lei nº 12.334/2010,

criando a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), com o objetivo de aumentar a segurança das barragens, padronizando ações, reduzindo a possibilidade de acidentes e propondo a centralização das informações sobre a barragem quanto ao risco e dano potencial. Além disso, a PNSB obriga a confecção do Plano de Ação Emergencial - PAE, caso a barragem possua classificação de risco à ruptura (SOUZA, 2019) ; (DIAS, 2017).

Após a aprovação da Lei em 2010, surgiram, posteriormente em 2012, algumas resoluções complementares, e o DNPM também incluiu algumas portarias que tinham o objetivo de regulamentar as obrigações exigidas pela PNSB. Em 2016, o DNPM incluiu a portaria nº 14, obrigando a apresentação de cópias físicas do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração – PAEBM, anteriormente chamado PAE. Essa portaria em especial foi incluída dois meses após o acidente em Mariana, em 2015 (Barragem do Fundão). Por fim, em 2019, o DNPM foi extinto e foi criada a ANM, que publicou uma resolução neste mesmo ano com os objetivos de aumentar o prazo de desativação de barragens que se encaixassem nos critérios e instalações de conveniência; aumentar o prazo para instalação de sirenes de alerta; e, por fim, definir o prazo de 15 de dezembro de 2020 como limite para barragens inseridas na PNSB com Dano Potencial Associado (DPA) alto instalarem um sistema de monitoramento automatizado de instrumentação com monitoramento em tempo real e período integral, afirmando ser de responsabilidade do projetista a definição técnica, e do empreendedor a definição tecnológica, dos instrumentos e do processo de monitoramento (SOUZA, 2019).

Em 2020, a Lei n° 14.066 faz alterações quanto à lei de criação da PNSB de 2010, quanto à Lei n° 7.797, de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), quanto à Lei n° 9.433 de 1997, que cria a Política Nacional de Recursos Hídricos e, por fim, o decreto-lei n° 227, de 1967, que é o Código de Mineração. Um dos pontos principais dessa Lei é a proibição da construção ou alteamento de barragens de mineração pelo método à montante, como também estabelece a Resolução n° 13 da ANM (2019) com o prazo para descaracterização até 25 de fevereiro de 2022. Ela ainda redefine alguns critérios para caracterização das barragens quanto ao risco e ao DPA e obriga à elaboração e disponibilização de um Plano de Segurança de Barragens (PSB) (BRASIL, 2020). Após sua publicação, foi emitida a norma 95 pela ANM e, no mesmo ano, a Resolução n° 121 da Agência Nacional de Águas (ANA), em complemento à Lei, estabelecendo critérios quanto ao nível da instrumentação na barragem e buscando garantir a segurança e a comunicação em emergências.

2.4 Instrumentação geotécnica de barragens de rejeito

Dada a importância da segurança de uma barragem, como visto nas seções anteriores, o Guia Básico de Segurança das Barragens (GBSB) impõe a necessidade de reavaliação

da segurança de barragens, envolvendo planos de operação, manutenção, inspeção e de emergência. A instrumentação e o monitoramento geotécnico surgem como pilares para tal avaliação de segurança e do plano de gestão de riscos (DIAS, 2017).

Segundo o autor, a instrumentação permite medir grandezas de interesse por meio de um processo de aquisição, registro e processamento de dados, sendo uma parte constituinte do processo de auscultação, juntamente com a inspeção visual. Ainda, o autor reforça a importância da manutenção dos equipamentos utilizados, que são de inteira responsabilidade da equipe técnica.

Dias (2017) define fatores para determinar o número mínimo de instrumentos necessários para um monitoramento efetivo. São eles:

- Tipo de instrumento;
- Condições de acesso ao local de instalação dos instrumentos;
- Extensão da área da barragem e estruturas auxiliares e;
- Aspectos técnicos e geológicos da fundação e do maciço.

Além disso, o autor resume os princípios da instrumentação nos pontos:

- O número de instrumentos deve ser o mínimo possível, mas garantindo uma avaliação efetiva da estrutura;
- Os instrumentos escolhidos devem ser os de menor interferência sobre a construção, isto é, devem ser de fácil manuseio para manutenção e substituição, caso necessário;
- Devem ser tomados cuidados especiais com instrumentos que podem gerar incertezas ou comportamentos imprevistos;
- Sua localização deve ser escolhida buscando aproveitar instalações já existentes na estrutura, como poços e dutos;
- Alguns aspectos são considerados para a escolha do instrumento, dentre eles: confiabilidade, sensibilidade, resistência e estabilidade.

Silva (2019), Machado (2007), Sestrem (2012) Bortolli (2025) e Campos et al. (2020) apresentam em seus trabalhos os principais instrumentos utilizados para o monitoramento de barragens. Eles serão descritos nas seções a seguir.

2.4.1 Piezômetros

Piezômetro é cada um dos dispositivos usados para medir a pressão dos fluidos ou a compressibilidade de substâncias sujeitas a pressões elevadas. Silva (2019) afirma que eles são utilizados para determinar os valores das poropressões (pressões de água) do subsolo, que causam variações no nível do lençol freático. Ainda, segundo Sestrem (2012), a operação do instrumento funciona da seguinte maneira: ele é instalado em um furo preenchido de areia na região de interesse e selado com um material impermeável, de modo a impedir a passagem da água. Os solos argilosos são os responsáveis por acumular poropressão no solo, e o valor resultante é determinado pela altura da coluna d'água no interior do piezômetro. Ambos os autores definem os principais tipos de piezômetros. São eles: *Standpipe* (ou tubo aberto), pneumáticos, hidráulicos, elétricos e de corda vibrante.

Figura 10 – Piezômetro de corda vibrante da fabricante RSTAR Instruments. Fonte: RST Instruments (2024).

De forma resumida, os piezômetros do tipo *standpipe* consistem em um tubo aberto que mede o nível de fluido por sondagem ou por meio de uma fita dentro do tubo, sendo esse o instrumento mais simples para medir a poropressão do solo. Já os pneumáticos operam por pressão de gás, onde as leituras são obtidas por um indicador pneumático, como um manômetro. Os hidráulicos, por sua vez, são constituídos por uma pedra porosa que envolve um reservatório de água, conectado a tubos flexíveis cheios de água que o ligam a um manômetro. O objetivo desse sistema é circular a água pelo instrumento para realizar a medição da poropressão. Os elétricos utilizam um diagrama defletor, cujas deflexões são identificadas por meio de um fio vibratório ou um extensômetro e são convertidas a uma pressão equivalente. Os Casagrande são feitos de tubo de PVC ranhurado ou perfurado em trechos, que submetidos a uma carga piezométrica, provocam a variação do nível d'água dentro do tubo. Assim, a medição é feita por meio de uma célula de areia. Por fim, os

de corda vibrante funcionam de maneira semelhante aos elétricos, porém, utilizam um cabo de aço tensionado que vibra com a pressão da água. A frequência dessa vibração é convertida em pressão (JUNIOR, 2021).

2.4.2 Medidores de Nível D'água

É o instrumento de mais fácil operação e construção, com o objetivo principal de determinar a posição da linha freática ao longo do maciço. Sua configuração é semelhante a do piezômetro e para sua instalação basta um furo de sondagem ou poço com a determinação da cota do nível d'água (MACHADO, 2007).

Segundo Sestrem (2012), sua construção é dada por um fio graduado, um carretel e um torpedo com uma chave elétrica. Quando o instrumento entra em contato com a água, um circuito elétrico se fecha, provocando um aviso sonoro. Devido a esse aviso, o medidor de nível d'água é comumente chamado de "pio" elétrico, referindo-se ao som emitido por ele. Assim, medindo-se a distância que o sensor precisou descer para atingir a água, sabe-se a profundidade no nível d'água no tubo.

Figura 11 – Medidor de nível d'água da fabricante Solinst. Fonte: Solinst (2025).

2.4.3 Medidores de Vazão

Silva (2019) aponta que a localização, quantidade e qualidade da água em uma barragem ou sua fundação podem ser problemas estruturais. Por isso, são variáveis importantes de serem medidas. Segundo o autor, a medição pode ser feita apenas com física em barragens de pequeno porte, dividindo o volume de água pelo tempo de coleta, sem a necessidade de um instrumento específico. No caso de barragens maiores, podem

ser utilizados métodos com o medidor triangular, retangular ou trapezoidal, ou ainda, a Calha Parshall. Assim, o fluxo de água é desviado para o medidor ou calha e a vazão pode ser medida.

Para Smiderle (2014), o medidor de vazão é todo dispositivo que permite determinar o volume de um fluido que passa através de uma seção de escoamento por unidade de tempo, possibilitando concluir o funcionamento do sistema de drenagem interna. Ainda segundo a autora, medidores de vazão triangulares são uma placa metálica, triangular, que é instalada no final do canal da barragem, a favor do fluxo. Ele não é recomendado para fluxos maiores, sendo o trapezoidal um ótimo substituto. Já o retangular é composto por uma placa delgada, posicionado de forma a proibir contrações laterais, isto é, instalada perpendicularmente ao escoamento e ocupando toda a largura do canal. A calha Parshall, utilizada em canais abertos, possui três seções, sendo elas uma convergente, uma estrangulada e uma divergente, também utilizada como medidor de vazão (CLEMENTE et al., 2023).

Figura 12 – Medidor de vazão do tipo Calha Parshall. Fonte: Controles (2025).

2.4.4 Inclinômetros

Segundo Sestrem (2012), os inclinômetros fazem parte do grupo de instrumentos para determinação de deslocamentos horizontais. Eles permitem identificar a profundidade da ruptura e monitorar a evolução dos movimentos em taludes ou encostas. A precisão das leituras depende diretamente da qualidade da ancoragem, sendo fundamental garantir uma fixação adequada de sua base.

Ainda segundo a autora, os inclinômetros podem ser posicionados em cadeias, conhecidos como inclinômetros *in place*. Eles são instalados em série ao longo de um furo de sondagem, permanecendo fixos. Sua grande vantagem em relação aos inclinômetros tradicionais é a possibilidade de leituras remotas por meio do sistema de automação.

Figura 13 – Inclinômetro *In Place* da fabricante Geokon Fonte: Geokon (2025).

2.4.5 Pluviômetros

Um pluviômetro é um instrumento utilizado para registrar a quantidade de precipitação em uma região. Essa medição ocorre por meio de uma proveta graduada, onde a água da chuva é coletada. A água é direcionada para a proveta por meio de um funil receptor, que possui um formato cilíndrico cônico e é acoplado na parte superior do equipamento. Esse reservatório, de estrutura cilíndrica, geralmente possui uma torneira que facilita a retirada do líquido acumulado. Ressalta-se que a escolha pelo formato cilíndrico do coletor se deve ao fato de proporcionar a mesma exposição ao vento, independentemente da direção em que ele incida (SESTREM, 2012).

Figura 14 – Pluviômetro Ville de Paris da fabricante JProlab Fonte: JProlab (2025).

2.4.6 Acelerômetros

Acelerômetros são dispositivos que medem o movimento, vibração ou aceleração de um objeto em relação a um referencial. Sua estrutura é baseada em um objeto de massa conhecida suspenso por uma mola. Quando o dispositivo sofre uma aceleração, a massa tende a se deslocar em direção à carcaça do sensor (BORTOLLI, 2025).

Segundo o autor, esse deslocamento pode ser medido de diversas formas. O método capacitivo de duas placas se refere a circuitos eletrônicos especiais, projetados para identificar variações extremamente pequenas de capacitância e transformá-las em um sinal de tensão já amplificado. Já o método piezoelétrico possui duas abordagens. Na primeira, são utilizados piezoresistores para detectar o estresse interno na mola. Na segunda, a própria mola é constituída de um material piezoelétrico (ou revestida por um filme fino piezoelétrico), capaz de produzir uma tensão elétrica proporcional ao deslocamento.

Figura 15 – Acelerômetro para medição de vibração da fabricante Svantek. Fonte: Svantek (2025).

2.4.7 Radares

A interferometria é uma tecnologia que estuda as interferências entre duas ou mais ondas. Radares interferométricos utilizam sinais de rádio para o monitoramento, baseados nessa tecnologia. Eles emitem ondas que, ao retornarem ao equipamento, permitem calcular o deslocamento da estrutura monitorada com base no tempo de chegada das ondas e na distância entre os objetos e o ponto de instalação (CAMPOS et al., 2020).

Existem diversos tipos de radares, dentre eles, o *InSAR*. Eles são radares orbitais que também funcionam com base no princípio da interferometria. Ao invés do equipamento ser instalado no solo, ele é instalado em satélites que orbitam a Terra. Tem como principais vantagens a cobertura em áreas remotas de difícil acesso, detecção prévia de acontecimentos lentos e análise histórica das imagens de satélite, porém, detecta apenas deslocamentos

superficiais e mais lentos, além de possuir uma sensibilidade limitada em algumas direções (LIMA et al., 2023).

O *GB-InSAR* é uma combinação da tecnologia interferométrica com os radares *InSAR*, porém, com operação em solo (*Ground Based*). Eles fazem a aquisição de dados de forma repetida, sempre a partir dos mesmos pontos de vista, possibilitando a avaliação de deslocamentos com alta resolução temporal e espacial (ROQUE, 2016).

Ainda, existe o radar *Doppler*, que, apesar de também medir deslocamentos superficiais, utiliza o efeito *Doppler* para medir a velocidade e a direção dos objetos em movimento. Ao contrário do *InSAR*, ele é utilizado para monitorar deslocamentos rápidos (FERREIRA et al., 2024).

Figura 16 – Radar RGR-Velox da fabricante GroundProbe. Fonte: GroundProbe (2025).

2.5 Sistemas de monitoramento de barragens de rejeito

A instrumentação geotécnica é uma parte fundamental do sistema de monitoramento das barragens de rejeito. Mas apenas os instrumentos não são suficientes para que os dados sejam coletados. O monitoramento pode ser feito de duas maneiras diferentes: manual, que era muito utilizado até a década de 90, e automático, que é utilizado até os dias atuais.

A monografia desenvolvida por Silva (2019), intitulada “Sistema de Monitoramento Online de Barragens de Mineração”, traz um estudo aprofundado sobre o funcionamento de barragens de mineração e sobre os instrumentos geotécnicos utilizados para realizar esse procedimento. O objetivo do trabalho é propor uma sugestão de monitoramento online desses instrumentos em uma barragem, no qual o próprio autor desenvolveu a automatização do sistema e disponibilizou os dados em tempo real, criando, ainda, um banco de dados. Como recursos, ele utilizou a instrumentação *wireless*, integrada a unidades centrais para comunicação com o sistema de automação e integração com a rede corporativa. Por fim, apresentou um estudo de caso, aplicando seu projeto em barragens nas cidades de Mariana e Ouro Preto, ambas em Minas Gerais, obtendo resultados alinhados às suas expectativas.

Machado (2007) traz uma contribuição teórica para o monitoramento de barragens de contenção de rejeitos, definindo os principais instrumentos utilizados nesse ramo, motivado pelos acidentes que vinham acontecendo com o rompimento das barragens.

Na seção anterior, foram descritos os principais instrumentos geotécnicos utilizados no monitoramento de barragens de rejeito. Nessa seção, o objetivo é descrever o sistema de automação da instrumentação, isto é, definir instrumentos como *dataloggers, gateways*, Unidades Terminais Remotas (RTUs), e *softwares* que são utilizados junto a esses equipamentos.

2.5.1 *Dataloggers*

O *Datalogger* é um dispositivo programado via *software* para executar tarefas desejadas, como captar e gravar dados ou ainda realizar cálculos matemáticos com as informações coletadas, gerar gráficos, tabelas, dentre outros (CUNHA et al., 2009).

Badhiye, Chatur e Wakode (2011) definem um *datalogger* como um dispositivo que, quando conectado a sensores, recebe seus estímulos físicos e os converte em sinais eletrônicos, como tensão e corrente elétrica. Posteriormente, esses sinais são convertidos em dados binários, facilitando a análise e armazenamento de informações. Esses instrumentos são baseados em processadores digitais e podem funcionar até 24 horas por dia, sendo essa uma de suas principais vantagens.

Monteiro (2023) e Badhiye, Chatur e Wakode (2011) também afirmam que apenas coletar os dados não é suficiente para uma aplicação assertiva de um registrador de dados, pois ele deve ser capaz de analisar e apresentar dados para uma possível tomada de decisões e determinação de resultados. Assim, definem os elementos necessários para uma aplicação completa do dispositivo:

- Experimento: Os diversos parâmetros que serão coletados de um ambiente ou objeto específico são utilizados como *input* para os sensores no momento do experimento;
- Sensores: O *datalogger* recebe *inputs* de várias fontes via sensores para medir parâmetros como temperatura, umidade, dentre outros, quando sinais elétricos são convertidos de acordo com essas variáveis;
- Interface do Usuário: Para a interação do *software* com os sensores, é fornecida uma interface utilizando um algoritmo implementado que, como resultado, permite o armazenamento e a análise dos dados;
- *Software*: Além de armazenar os dados por um longo período de tempo, exibe as informações dos sensores.

Figura 17 – Datalogger CR310 da fabricante Campbell Scientific. Fonte: Campbell Scientific (2024).

Dessa forma, o *Datalogger* é utilizado em sistemas de monitoramento conectados diretamente aos sensores (caso isso seja permitido pelas configurações de ambos os dispositivos) e coleta seus dados de forma automática.

2.5.2 *Gateways*

Um *Gateway* é um dispositivo que promove a comunicação entre diferentes tipos de redes. Ele é utilizado como ponte entre meios e protocolos distintos, e também é uma estação concentradora de dados, isto é, recebe informações de diversos dispositivos e, em seguida, transmite essas informações para um servidor, por exemplo (SILVA, 2019).

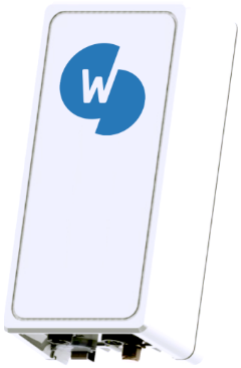

Figura 18 – Gateway Cloud da fabricante WorldSensing. Fonte: WorldSensing (2024a).

Pastório et al. (2021) aponta que um *Gateway*, também chamado concentrador ou ponto de acesso, é capaz de estabelecer conexões com vários dispositivos, recebendo essas informações e as repassando para um servidor de rede utilizando um protocolo de comunicação, como Ethernet, *Wi-fi*, LTE.

Também é possível, por meio de um *gateway*, saber qual a localização dos dispositivos conectados a ele, já que eles são capazes de transmitir informações de tempo, e então, relacionar o tempo de chegada dos sinais de múltiplos dispositivos. Eles estão presentes

em diversos tipos de configuração, como topologias em estrela, por exemplo (CHAUDHARI; ZENNARO; BORKAR, 2020).

2.5.3 Unidade Terminal Remota

Segundo o livro *Process Control, Automation, Instrumentation and SCADA* (IDC TECHNOLOGIES, 2012), uma Unidade Terminal Remota (UTR ou RTU, em inglês) é uma unidade autônoma de aquisição de dados e controle, capaz de monitorar equipamentos em uma localização remota a partir de uma estação central, transferindo os dados coletados para ela. Sua estrutura é baseada em um microprocessador.

Figura 19 – RTU L900 da fabricante RSTAR Instruments. Fonte: RST Instruments (2025).

2.6 Meios de comunicação

Nesse tópico, serão analisados os meios de comunicação propostos nos Objetivos Específicos.

2.6.1 *Wi-fi*

Wireless Fidelity é o termo utilizado para representar as conexões entre dispositivos que acontecem em alta velocidade e sem fios, popularmente conhecido como *Wi-fi*. Seu funcionamento é baseado em ondas de rádio, transmitidas por meio de um roteador que recebe os sinais, os decodifica e os transmite utilizando uma antena (BARROS, 2021).

O *Wi-fi* é baseado no padrão IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) 802.11 e representa as tecnologias de rede sem fio (WLAN). A tecnologia *Wireless*, que já vinha sendo estudada desde o século XIX, teve um grande avanço devido a Segunda Guerra Mundial, impulsionada por necessidades militares de comunicação à distância, rapidez e, principalmente, segurança. Portanto, os principais objetivos dessa tecnologia

eram alta imunidade a ruídos, baixa interferência em outros sistemas e dificuldade de ser interpretado ou monitorado (RAMOS, 2020).

Com o avanço das redes industriais, o *Wi-fi* passou a ser considerado uma tecnologia de transmissão *wireless* em potencial para sistemas diversos (FERTIG, 2018).

Esse meio de comunicação apresenta várias versões, sendo as principais a/b/g/n/ac/ax. O Wi-fi opera com um número limitado de dispositivos conectados simultaneamente em um mesmo canal. Nos padrões mais antigos (802.11b/g), na faixa de frequência de 2,4 GHz, que varia de 2,4 a 2,4835 GHz, são disponibilizados 13 canais. No entanto, conforme aponta Oliveira (2017), essa faixa apresenta uma limitação significativa: os canais possuem apenas 5 MHz de espaçamento entre si, enquanto a largura de banda utilizada por cada canal é de 22 MHz. Isso provoca sobreposição entre canais adjacentes, tornando inviável o uso simultâneo de canais próximos e comprometendo a eficiência da comunicação. Para contornar esse problema, foram disponibilizados outros 23 canais na faixa de frequência de 5 GHz, onde eles não se sobrepõem. O novo desafio encontrado é a compatibilidade com os equipamentos IoT, que normalmente não trabalham em frequências muito altas ou, quando trabalham, têm custo elevado.

Com o aumento sem precedentes na densidade do uso do *Wi-fi*, o *Wi-fi* 6 foi proposto para operar na faixa de 6 GHz, que já é utilizada por outros serviços como televisão e radiodifusão. Por isso, o uso da faixa de 6 GHz pelo *Wi-fi* 6 precisa ser coordenado de modo a não interferir nos demais serviços (PARK et al., 2024). Atualmente, a tecnologia já evoluiu para as versões *Wi-fi* 7 e *Wi-fi* 8.

Qorvo (2023) apresenta uma tabela comparativa (Tabela 1) com as diferentes versões do Wi-fi, onde é possível analisar bandas de frequência, largura de banda e taxa máxima de transferência. Em complemento, adaptou-se essa tabela com as informações de alcance máximo, apresentadas por Gunathilake, Al-Dubai e Buchanan (2020) em seu artigo.

A subcamada de acesso ao meio do *Wi-fi*, responsável por controlar qual dispositivo pode realizar a transmissão a cada momento, é do tipo *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* - CSMA/CA, ou Acesso múltiplo com verificação de portador e eliminação de colisão, já que na maioria das aplicações do *Wi-fi* as redes são do tipo ponto-multiponto, ou seja, vários equipamentos podem receber as informações transmitidas. O CSMA/CA funciona como uma fila, onde, no momento da transmissão, todos os dispositivos ligam seus rádios e escutam o canal para checar se já não há outro dispositivo transmitindo. Ainda, antes de transmitir, é necessário que o dispositivo solicite permissão ao seu destinatário, pois pode haver outro dispositivo fora de seu alcance que já está transmitindo, conforme Figura 20 (OLIVEIRA, 2017).

Tabela 1 – Comparativo entre as gerações da família 802.11

IEEE 802.11	Data de Lançamento	Banda de Frequência (GHz)	Largura de banda (MHz)	Transferência Máxima (Mbps)	Alcance máximo (m)
802.11a	1999	5	22	2000	120
802.11b	1999	2.4	22	11	140
802.11g	2003	2.4	20	54	140
802.11n	2009	2.4/5	20/40	600	250
802.11ac	2013	5	20/40/80/160	6800	70
802.11ax	2019	2.4/5	20/40/80/160	10000	70–240

Fonte: Adaptado de Qorvo (2023), Gunathilake, Al-Dubai e Buchanan (2020).

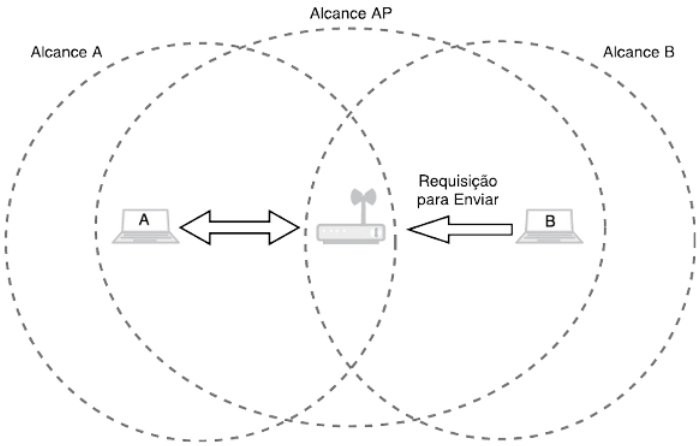

Figura 20 – Funcionamento do protocolo CSMA/CA na subcamada de acesso ao meio do *Wi-fi*. Fonte: Oliveira (2017).

2.6.2 ZigBee e Bluetooth Low Energy

O *ZigBee* é um meio de comunicação que faz parte das redes *Wireless Personal Area Network* (WPAN), que seriam Redes Pessoais Sem Fio. Esse tipo de rede é específico para fornecer uma conexão entre dispositivos eletrônicos dentro de espaços curtos. O *ZigBee* opera nas faixas de frequências de 2,4 GHz, 868 MHz e 915 MHz, sendo sua taxa máxima de transmissão de 250 kilobits por segundo (kbps) e alcance de 100 metros (PASTÓRIO et al., 2021). Na faixa de 2,4 GHz, tem-se disponíveis 16 canais, numerados de 11 a 26, com intervalo de 5 MHz. Sua latência pode variar de acordo com a utilização, sendo de 10 a 30 ms para redes simples, de 80 a 130 ms para redes mais complexas, ou até na faixa de segundos, para projetos com alta carga (SILICON LABS, 2025); (MEDENICA et al., 2025).

De acordo com Silva (2019), ele foi proposto em 2003, e construído e homologado seguindo o padrão IEEE 802.15.4, que é o padrão que descreve técnicas e métodos para

a aplicação de redes de sensores sem fio industriais. Tem como principais características o baixo consumo de energia, baixa taxa de transmissão e baixo custo de implementação, além de especificação aberta e interoperabilidade. Suas principais aplicações se dão em dispositivos energizados por baterias, sistemas de segurança, medida e leitura, e aplicações industriais, como gestão de ativos. Os dispositivos são formados por um microcontrolador, um transceptor e uma antena, e as especificações de programas são embarcados (DUTRA et al., 2022).

Segundo o autor, o *ZigBee* utiliza o CSMA/CA na subcamada de acesso ao meio, como maneira de evitar a colisão por transmissão simultânea de dispositivos. Também pode utilizar o Guaranteed Time Slot (GTS), onde é disponibilizado um *slot* de tempo para que cada dispositivo transmita.

O *ZigBee* também possui duas características muito importantes, que são o *self-forming* e o *self-healing*. Elas se referem, respectivamente, à capacidade de formar uma rede e a capacidade de reorganizar uma rede (DUTRA et al., 2022). O padrão IEEE 802.15.4 define três topologias de rede, sendo elas estrela, árvore e malha, exibidos na Figura 21.

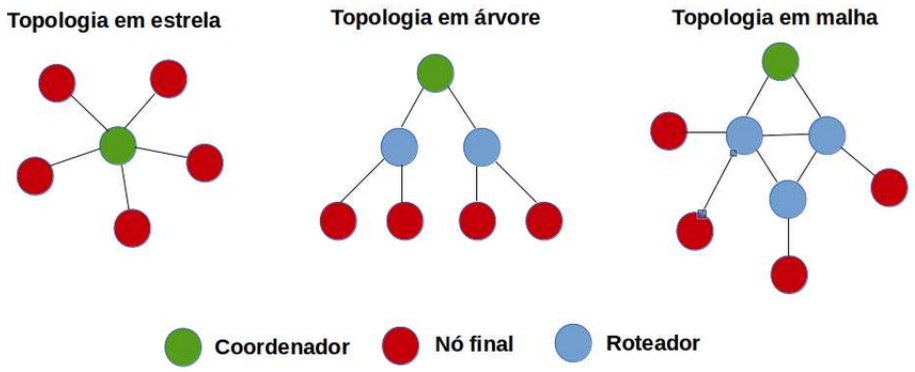

Figura 21 – Topologias de rede do padrão IEEE 802.15.4: estrela, árvore e malha. Fonte: Gomes, Alencar e Fonseca (2013).

Existem dois tipos de dispositivos que seguem o padrão *ZigBee* que estão dispostos nessas topologias: os *Full Function Devices* (FFD) e os *Reduced Function Devices* (RFD).

- FFD: podem executar todas as funcionalidades descritas no padrão IEEE 802.15.4. Podem ser coordenadores, ou seja, selecionam os canais a serem utilizados pela rede, inicializam a rede, atribuem endereços, excluem/incluem dispositivos na rede, listam roteadores vizinhos e transmitem pacotes de dados e de aplicação. Também englobam os roteadores, cuja função é expandir a cobertura em topologias de rede, especificamente do tipo árvore.

- RFD: São os dispositivos de borda, ou finais, de uma rede, que se conectam aos coordenadores e roteadores. Podem ser do tipo *ZigBee Trust*, que fazem o gerenciamento e distribuição de chaves de segurança e autenticação para os demais dispositivos,

ou do tipo *ZigBee gateway*, que fornece conexão externa para a rede *ZigBee*, e são capazes de converter protocolos de comunicação.

O *Bluetooth* também faz parte das redes WPAN e é definido no padrão IEEE 802.15.1. Apesar de trabalhar na mesma frequência de 2,4 GHz e possuir uma taxa de transmissão de dados maior (1 Mbps), ele possui um alcance menor, de 50 metros (PASTÓRIO et al., 2021). O *Bluetooth Low Energy* (BLE) é uma variação do *Bluetooth*. Sua principal característica é o baixo consumo de energia, ideal para aplicações que exigem um tempo de vida elevado para a bateria. Possui latência de 6 ms, comparada a latência de 100 ms do *Bluetooth* convencional (MOKO SMART, 2023). Um módulo BLE pode ser visto na Figura 22.

Figura 22 – Módulo *Bluetooth Low Energy*. Fonte: Curto Circuito (2025).

2.6.3 Internet via modem celular

A Internet móvel, acessada por meio de modems celulares e amplamente utilizada em *smartphones*, evoluiu ao longo do tempo por meio de diferentes gerações de tecnologia, conhecidas como 1G – 5G.

Ojope (2024) detalha em sua tese o crescimento das redes via modem celular. Inicia-se em 1979 com a primeira geração, a 1G, cujo objetivo era fornecer chamadas de voz básicas por meio de sinais de rádio analógicos, com velocidade média de 2,4 Kbps. A falta de criptografia, má qualidade do som, baixa cobertura e falta de compatibilidade entre sistemas em diferentes frequências foram as principais deficiências da 1G. Para superá-las, foi lançada a segunda geração, a 2G, oficialmente em 1990 por meio da rede *Global System for Mobile Communications* – GMS, ou Sistema Global para Comunicações Móveis. Houve uma melhora na qualidade da voz e das chamadas, maior cobertura e criptografia. Foi onde surgiram serviços importantes que até hoje são muito utilizados, como o envio de mensagens de texto (SMS), conferência de chamadas, chamadas em espera e a cobrar.

Segundo o autor, a 3G foi introduzida em 2001, possibilitando videochamadas, teleconferências, filmes, *e-mail*, músicas e, pela primeira vez, o acesso simultâneo a funções

de voz e dados. Foi um grande avanço na transmissão de dados a um custo menor, em uma rede ainda mais segura. Contudo, a 3G exigiu que as operadoras aumentassem a sua infraestrutura para permitir maior largura de banda, ou até mesmo começar uma infraestrutura completamente nova.

Já a quarta geração (4G) trouxe um aumento ainda mais significativo da taxa de transferência de dados em alta velocidade, chegando em até 100Mbps, mesmo quando o servidor ou os dados receptores estão em movimento. Com o objetivo de ser uma rede móvel rápida, barata e de segurança, a 4G supera a 3G no quesito de interoperabilidade, possibilitando diferentes sistemas, dispositivos e aplicações de se comunicarem. A 4G utiliza duas principais tecnologias: o *Worldwide Interoperability for Microwave Access* – WiMAX, ou Interoperabilidade Mundial para Acesso por Micro-ondas, em português, e o *Long Term Evolution* – LTE, ou Evolução a Longo Prazo.

- WiMAX: Com um raio de celular de 2 a 7km, possui taxa de dados máxima de 75 Mbps para *Downlink Indicator* (DI), ou seja, dados da rede para o usuário e de 25 Mpbs para *Uplink Indicator* (UI), referente a transmissão de dados do usuário para a rede. Ainda, suporta a mobilidade de usuários em movimento a velocidades de até 120 km/h.
- LTE: Possui DI de 100 Mbps e UI de 50 Mbps, superando o WiMAX. Além disso, suporta a mobilidade de usuários em movimento a velocidades de até 350 km/h e raio celular de 5km.

O LTE acabou sobressaindo o WiMAX. No início de 2019, surgiu a tecnologia da quinta geração, a 5G, com ainda maiores velocidades e menor latência, e uma melhora significativa na interoperabilidade. A eficiência da rede móvel e a forte conectividade abriram portas para a IoT, Inteligência Artificial, realidade aumentada e computação em nuvem, transmitindo dados em taxas de 1-10 Gbps. Essa geração da telefonia móvel ainda continua em desenvolvimento até os dias atuais.

2.6.4 Internet Satelital

Segundo Ferreira (2021) a Internet Satelital funciona, como o nome indica, por meio de satélites, com o objetivo de fornecer conexão de internet a locais com pouca cobertura. O autor explica que o satélite faz a conexão entre o servidor da operadora e o cliente, por meio de antenas parabólicas de forma bidirecional, sendo muito utilizada em locais que a banda larga tradicional não se faz presente ou em situações de movimentação contínua. Dentre as conexões de banda larga, a internet satelital se destaca pelo alcance muito ampliado. Não depende de cabeamento, o que é uma grande vantagem em localidades

distantes, mas requer uma ligação direta com o provedor (e há um número escasso de provedores) e ainda possui um alto custo de instalação.

Jose (2022) explica de forma mais detalhada o funcionamento desse protocolo: A conexão se inicia com um ISP – Internet Service Provider ou Provedor de Serviços de Internet. O ISP é o responsável por enviar satélites para orbitar ao redor da terra e utiliza antenas parabólicas instaladas em solo com visão desobstruída do céu para receber o sinal transmitido. As antenas são conectadas em modens para traduzir o sinal recebido do satélite e obter uma conexão de internet. Os satélites em órbita recebem um sinal da Terra por um HUB, ou estação terrena central. O HUB é o ponto central de comunicação entre os satélites e a internet global. O sinal é enviado da Terra para os satélites por meio do feixe ascendente (*uplink*), que corresponde aos dados solicitados pelos usuários, como sites, vídeos etc. O satélite retransmite esses dados pelo feixe descendente (*downlink*), redirecionando para as antenas. Os dois feixes possuem frequências diferentes para que não sofram interferência. De forma resumida, o HUB gerencia todo o tráfego de dados entre os usuários remotos e a internet. Suas características de transmissão dependem do ISP em questão.

A *SpaceX*, que é uma das principais provedoras de internet satelital, fornece conectividade rápida e facilitada por meio de suas antenas *Starlink*. Também existem outros ISPs, como a *SpaceSail* e a *E-space*. A *SpaceSail*, empresa privada chinesa, tem previsão de início de operações no Brasil em 2026, e pode se tornar uma grande concorrente da *SpaceX*, já que procura trabalhar com a mesma estratégia da *Starlink*: alta confiabilidade, especialmente para áreas remotas, utilizando satélites de órbita baixa (PIMENTEL, 2024). A *E-space*, empresa franco-americana, também pode se tornar concorrente das demais. Um dos seus pilares é a sustentabilidade que, segundo o *site* da empresa, é tão importante quanto a economia. Prometem transformar o desempenho, capacidade de transmissão e custo total dos sistemas de internet satelital (E-SPACE, 2025).

Todavia, a *SpaceX* já tem um mercado consolidado no Brasil, por isso, será utilizada neste trabalho. Como os roteadores da *Starlink* utilizam o *Wi-fi* 6 como tecnologia, será considerado seu alcance teórico (isto é, em condições ideias), que varia entre 70 e 240 m.

A seguir, serão analisados os principais planos da provedora, com a finalidade de utilizar tais informações para uma comparação justa com os demais meios de comunicação.

O plano *Starlink Bussiness* apresenta taxas de transmissão que variam de 40 a 220 Mbps para *downlink* e 8 a 25 Mbps para *uplink*, além de latência entre 20 a 60 ms. Possui o plano de dados prioritários, onde os clientes que adquirem esse plano têm prioridade na rede e velocidades mais rápidas, além de suporte 24h por dia, 7 dias por semana e um IP público fixo (SPACEX, 2025a).

O plano *Starlink* residencial possui velocidade de *downlink* de 100 a 250 Mbps e

de *uplink* de 10 a 25 Mbps, com latência de 20 a 40 ms. Já o plano *Starlink* Viagem é bem semelhante ao plano residencial, porém, tem menor prioridade na rede, isto é, as velocidades de transmissão podem abaixar durante horários de pico (SPACEX, 2025a).

Figura 23 – Antena Starlink Performance primeira geração. Fonte: SpaceX (2025b).

2.6.5 Ethernet

Segundo Oliveira (2017), a Ethernet é o padrão de rede mais comum, definida no padrão IEEE 802.3. Sua função é interligar vários dispositivos em uma rede, possibilitando que se comuniquem. Isso é feito por meio do endereçamento dos dispositivos e da definição do modo de comunicação, utilizando TCP/IP (Transport Control Protocol/Internet Protocol) ou UDP/IP (User Datagram Protocol/Internet Protocol) na camada de transporte.

O IEEE 802.3 é o padrão Ethernet utilizado para interconectar redes locais (LANs) que é baseado no modelo de comunicação Open Systems Interconnection – OSI, abrangendo as camadas física e de enlace de dados. Esse padrão define como os dados são enviados, recebidos e transmitidos pela rede. Apesar da Ethernet ter sido criada na década de 1970, o IEEE só publicou o padrão em 1985 (MOREIRA, 2024).

Vieira (2022) explica a evolução da Ethernet. Os primeiros meios de comunicação eram cabos de pares metálicos, com alta atenuação, que depois passaram a ser cabos de pares trançados e, em seguida, cabos coaxiais A tecnologia mais atual é a fibra óptica, que possui baixa atenuação e alta taxa de transmissão de dados, um aumento significativo quando comparado aos outros meios. Uma das maiores vantagens da fibra óptica é a transmissão de dados a longas distâncias, porém, isso gera um alto custo inicial de implantação.

Albini (2017) cita com mais detalhes os meios físicos de comunicação Ethernet:

- Cabos coaxiais: um fio condutor interno envolto por anéis isolantes. Muito resistente e pode ser utilizado em distâncias maiores, porém, é mais caro.

- Cabos de pares trançados: dois fios de cobre encapados e entrelaçados. O entrelaço diminui as interferências eletromagnéticas. Pode ser sem blindagem (*Unshielded Twisted Pair* – UTP) ou com blindagem (*Shielded Twisted Pair* - STP). Possui várias categorias que variam a espessura do fio e a distância percorrida, consequentemente variando a largura de banda: CAT3, CAT4, CAT5, CAT5E, CAT6, CAT7 e CAT 8.

- Fibra óptica: composta por fibras de vidro com índices de refração diferentes, cobertas por uma proteção que absorve a luz. Capaz de conduzir um raio óptico. Seu funcionamento depende de uma fonte de luz em uma ponte em um detector na outra. Basicamente, a ponta que irá transmitir os dados converte o sinal elétrico da fonte de luz em pulsos de luz, e a ponta que recebe os dados converte os pulsos em sinal elétrico novamente. Para a fibra óptica, um pulso de luz indica um bit e a ausência de luz indica zero bit. Dentre os demais meios de transmissão Ethernet, a fibra é a com a maior capacidade de largura de banda e velocidade (centenas de Gbps por muitos km), menor tamanho e menor peso, menor atenuação, além de ser imune a interferências externas e não irradiar energia.

O autor também traz em seu livro quatro versões da Ethernet, diferenciadas principalmente pelo comprimento máximo em que o sinal será prorrogado.

- Redes Ethernet 10 Mbps: Utiliza o *Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection* (Acesso Múltiplo com Escuta de Portadora e Detecção de Colisão) - CSMA/CD como técnica de controle de acesso ao meio. Basicamente, o CSMA/CD faz com que o dispositivo escute o meio para ver se está livre antes de transmitir. Como todos os dispositivos compartilham o mesmo meio físico (cabeamento), quando dois deles tentam fazer a transmissão dos dados, ocorre uma colisão. Esse padrão pode alcançar até 500m de comprimento máximo de segmento.

- *Fast Ethernet* (rede Ethernet 100 Mbps): criada em 1995 (padrão 802.3u) pela necessidade de uma largura de banda maior e de diminuir a quantidade de dispositivos utilizados com a rede Ethernet de 10 Mbps (roteadores, hubs, *switches*). Também utiliza o CSMA/CD como algoritmo para compartilhar o meio e possui alcance de até 2 km.

- Gigabit Ethernet (rede Ethernet de 1 Gbps): Em 1999, surgiu o padrão 802.3ab, com velocidades de 1 Gbps. Dentro do padrão IEEE, sua distância máxima é de 5km, porém, existem versões fora do padrão que proporcionam alcances de até 100km (1000BASE-ZX).

- 10 Gigabit Ethernet: Com distância máxima de até 40km, foi definida em 2002 no padrão 802.3ae, mil vezes mais rápida que a primeira Ethernet desenvolvida. Foi

quando o CSMA/CD deixou de ser utilizado, pois passou-se a usar comunicação *full-duplex* com *switches*. Os *switches* criam canais de comunicação dedicados entre os dispositivos, isto é, os dispositivos podem enviar e receber dados simultaneamente sem o risco de colisões e, como não há o compartilhamento do meio físico, o CSMA/CD deixa de ser necessário. Além disso, o *full-duplex* faz com que a largura de banda da rede dobre, já que é possível, por exemplo, enviar 1 Gbps e receber 1 Gbps ao mesmo tempo, ou seja, 2 Gbps bidirecionalmente. Essa tecnologia também se estendeu às versões anteriores da Ethernet.

Além das versões citadas por Albini (2017), algumas versões mais atualizadas também tomaram espaço no mercado, com ainda mais velocidade de transmissão de dados. Foroughi (2024) explora essa evolução em sua tese. Entre o período de 2010-2016, foi lançado o padrão de Ethernet IEEE 802.3ba, com especificações de 40 Gbps (até 150km) e 100 Gbps (até 40km). Já em 2017, houve a ratificação das versões 200 Gbps e 400 Gbps, por meio de vias de sinal de 50 Gbps.

Ainda, segundo o IEEE Standards Association (2024), o padrão IEEE 802.3df foi desenvolvido em 2024 trazendo a Ethernet 800G, com velocidades ainda mais elevadas. A expectativa para o futuro do padrão Ethernet é que em 2026 já se trabalhe com a versão 1.6 Tbps.

3 Desenvolvimento

Com base no Capítulo 2 deste trabalho, Revisão Bibliográfica, foi possível realizar um estudo sobre os meios de comunicação propostos: *Wifi, Zigbee*, *Bluetoooth Low Energy*, Internet via modem celular, Internet Satelital e Ethernet.

Vale ressaltar que, atualmente, o 4G ainda é amplamente utilizado no monitoramento de barragens em comparação ao 5G, principalmente por oferecer maior cobertura geográfica, especialmente em áreas remotas onde o 5G ainda está em fase de expansão (OJOPE, 2024). Embora o 5G proporcione menor latência, essa característica não é essencial nesse contexto, já que a latência do 4G é suficiente para as demandas de monitoramento geotécnico: varia de 20 a 50 ms (MVNO INDEX, 2025). Além disso, o 5G exige infraestrutura específica e novos dispositivos IoT, enquanto o 4G já conta com uma rede consolidada e compatibilidade com os equipamentos existentes. Soma-se a isso o alto custo de implementação do 5G, o que torna o 4G uma solução mais viável e econômica (IPEA, 2021). Por esses motivos, a maioria dos sistemas de monitoramento geotécnico ainda opera com tecnologia 4G, como é o caso de dispositivos de fabricantes reconhecidas, como a *Worldsensing* (WORLDSENSING, 2025). Nesse sentido, será considerada a tecnologia 4G para o comparativo.

Para a Ethernet, será considerada a Fast Ethernet, com velocidade de 100 Mbps. Essa taxa de transmissão é suficiente para o monitoramento de barragens, não sendo necessárias velocidades superiores. O trabalho de Hui et al. (2021) demonstra a utilização de uma rede inferior a 1 Gbps para o monitoramento de uma estrutura, reforçando a adequação dessa escolha. Conforme O'Farrell e Khadye (2019), a Ethernet apresenta latências extremamente baixas, na faixa de nanosegundos. No entanto, em um ambiente de monitoramento com maiores distâncias entre os dispositivos, considera-se, para efeito de projeto, uma latência máxima de 1 ms.

Pelo mesmo motivo, será adotada a versão 802.11n do Wi-Fi. Torres (2017) ressalta que o padrão 802.11n representou um avanço relevante ao introduzir a tecnologia *Multiple Input Multiple Output* (MIMO), permitindo taxas de transmissão de até 600 Mbps e operação em duas faixas de frequência (2,4 GHz e 5 GHz). Em contraste, o padrão 802.11ac funciona exclusivamente na faixa de 5 GHz, garantindo maiores velocidades, mas com alcance reduzido. Como observa o autor, o aumento da frequência está diretamente associado à diminuição da cobertura, característica desfavorável para aplicações como o monitoramento de barragens, nas quais o alcance é um requisito crítico. Além disso, versões mais recentes do Wi-Fi oferecem taxas ainda mais elevadas; no entanto, esse ganho de desempenho está atrelado a custos de implementação significativamente maiores,

comprometendo a viabilidade para este tipo de aplicação. A latência dessa versão do *Wi-fi* é, segundo VDMA (2019), de 5 a 30 ms. De forma prática, essas escolhas oferecem desempenho adequado à aplicação em questão e ainda evitam gastos adicionais não necessários.

Conforme o Objetivo Geral proposto, a comparação será feita com base nos seguintes critérios: alcance/cobertura, confiabilidade da comunicação, velocidade, consumo de energia, custos e tempo de implementação.

3.1 Alcance e cobertura

O alcance e a cobertura de uma tecnologia influenciam diretamente no projeto de automação do monitoramento de barragens. A quantidade de dispositivos que será utilizada, por exemplo, depende dessas duas variáveis, bem como a altura em que o *gateway* será instalado. Normalmente, os *gateways* já são instalados em postes, porque locais mais altos oferecem maior visada e, consequentemente, melhor qualidade do sinal.

A Tabela 2 apresenta o comparativo dessas tecnologias para os critérios de alcance e cobertura, já apresentados ao longo do trabalho:

Tabela 2 – Comparativo de alcance e cobertura

Tecnologia	**Alcance típico**	**Observações**
Wi-Fi	250 m	Boa cobertura local
ZigBee	Até 100 m	Não depende de cobertura
BLE	Até 50 m	Não depende de cobertura
4G	5 km	Boa cobertura em locais remotos
Starlink	70 - 240 m	Boa cobertura em locais remotos
Ethernet	2 km	Não depende de cobertura

Fonte: Elaborado pela autora.

3.2 Confiabilidade da comunicação

Os dados do monitoramento de barragens são considerados dados críticos, isto é, não podem ser perdidos, apresentar erros, *outliers* devem ser investigados e tratados e a transmissão de informações deve acontecer de forma contínua. A frequência de leitura dos dados pode variar a depender do nível de criticidade da barragem, todavia, existem mecanismos, como *triggers*, que podem ser acionados principalmente em casos de emergência.

Nessas situações, o monitoramento deve ser preciso e rápido, não havendo espaço para falhas.

O *Wi-fi* é um dos meios de comunicação mais utilizados para comunicação IoT, especialmente por sua facilidade de instalação e mobilidade, já que os dispositivos integrados podem se reposicionar a todo instante para acessar informações e recursos computacionais.

Entretanto, devido ao protocolo utilizado na subcamada de acesso ao meio, o CMSA/CA, o *Wi-fi* apresenta uma limitação quando há uma grande quantidade de instrumentos com demanda de transmissão. Isso porque o canal de comunicação tende a ficar sempre muito ocupado, e a fila de transmissão se tornará cada vez maior, podendo inclusive congestionar o canal, como acontece em eventos e espaços públicos. Em sistemas de monitoramento geotécnico com muitos *gateways* (mais de 10–15 dispositivos transmitindo simultaneamente no mesmo canal), a transmissão de dados via *Wi-fi* para o servidor pode ficar comprometida, o que é uma grande desvantagem considerando a importância do monitoramento em tempo real, principalmente em barragens que oferecem risco potencial. O mesmo acontece para o *ZigBee*, que também utiliza o CSMA/CA na subcamada de acesso ao meio.

Quando comparado com a Ethernet, isso não é um problema, uma vez que atualmente existe a tecnologia *full-duplex* via *switches* que possibilita que os dispositivos enviem e recebam dados simultaneamente com uma menor possibilidade de colisões.

Oliveira (2017) reforça a limitação física do *Wi-fi*, devido a utilização de roteadores na maioria das suas aplicações. Barragens são locais com condições adversas, como poeira, chuva, vibração, barreiras físicas, interferências eletromagnéticas, dentre outras, o que não é favorável ao uso de equipamentos sensíveis. Essa limitação também se estende à Ethernet e a Internet Satelital, porque necessitam de cabeamento, ou antenas e modems específicos, e os cabos, *switches*, antenas e demais dispositivos também ficam suscetíveis a tais condições. Apesar de haver meios de proteção, como gabinetes metálicos, eles não são suficientes para garantir que os equipamentos não serão afetados e ainda, podem interferir no sinal (como no caso dos roteadores e antenas), por serem barreiras físicas (caso os dispositivos estejam localizados dentro do gabinete).

O BLE, por sua vez, apresenta confiabilidade média na transmissão dos dados, sendo sua principal limitação a distância dos dispositivos e a quantidade de equipamentos conectados simultaneamente. Como mencionado na seção anterior, o alcance dessa tecnologia é de aproximadamente 50m. Ainda, assim como o *ZigBee*, o BLE depende de um ambiente com pouca interferência eletromagnética, o que pode interferir diretamente na transmissão dos dados. Entretanto, sofrem menos com essa questão do que o *Wi-fi*.

Devido às questões de alcance e cobertura apresentadas, a Ethernet é considerada a mais segura no quesito de confiabilidade de comunicação, justamente por ser cabeada e não

depender da tecnologia *wireless*, sendo inclusive imune a interferências eletromagnéticas quando utilizada a fibra óptica. A Tabela 3 apresenta o comparativo das tecnologias para o critério de confiabilidade.

Tabela 3 – Comparativo de confiabilidade da comunicação

Tecnologia	**Confiabilidade**	**Observações**
Wi-Fi	Muito baixa	Desfavorecido pelo CSMA/CA e interferências externas
ZigBee	Baixa	Desfavorecido pelo CSMA/CA
BLE	Média	Limitado pelo alcance máximo
4G	Média-alta	Depende da cobertura da operadora
Starlink	Alta	Confiável, conta com boa visada para o céu
Ethernet	Muito alta	Cabeada, imune a interferências eletromagnéticas (fibra óptica)

Fonte: Elaborado pela autora.

3.3 Velocidade

A velocidade é um parâmetro importante a ser considerado na escolha de um meio de comunicação em aplicações críticas, como o monitoramento de barragens. Isso porque, somada à confiabilidade dos dados, é essencial para auxiliar a tomada de decisões em tempo hábil, garantindo agilidade na entrega das informações, especialmente em situações emergenciais.

Esse parâmetro depende de duas características importantes: a taxa de transmissão de dados e a latência. Ainda que uma taxa de transmissão de dados altíssima não seja necessária, é importante que o meio de comunicação forneça uma velocidade mínima estável. Quanto a latência, o ideal é que seja baixa, para evitar atrasos, especialmente em redes com muitos dispositivos operando. É importante destacar que fatores como número de dispositivos, topologia, interferências e carga de tráfego influenciam diretamente no tempo de transmissão. O *ZigBee*, por exemplo, pode apresentar uma latência mais alta em sistemas de monitoramento de barragens, pois seu curto alcance provavelmente levaria a utilização das topologias em árvore ou malha, que, por envolver o uso de roteadores, prejudicaria a latência.

No Capítulo 2, foram evidenciadas as velocidades dos meios de comunicação utilizados nesse comparativo. Portanto, a Tabela 4 mostra de forma mais didática essa comparação.

Tabela 4 – Comparativo de velocidade

Tecnologia	**Taxa Máxima de Transmissão de dados**	**Latência**
Wi-Fi	600 Mbps	5-30 ms
ZigBee	250 Kbps	80-130 ms
BLE	1 Mbps	6 ms
4G	50 Mbps	20-50 ms
Starlink	8-25 Mbps	20-60 ms
Ethernet	100 Mbps	1 ms

Fonte: Elaborado pela autora.

3.4 Consumo de energia

O consumo de energia atrelado a uma tecnologia de comunicação pode favorecer ou não um projeto de automação, visto que impacta diretamente no custo total. No entanto, essa é uma análise mais complexa, pois o consumo depende não apenas da tecnologia em si, mas também de fatores como frequência de transmissão, número de dispositivos, topologia da rede e condições operacionais. Por esse motivo, não é possível atribuir valores genéricos de consumo de energia, sendo necessário avaliar cada caso específico para determinar a eficiência energética real da solução adotada.

A *Starlink* é a tecnologia que consome mais energia dentre as comparadas: cerca de 75W contínuos, devido a antena motorizada (SPACEX, 2025a). As demais tecnologias contam com o consumo de seus dispositivos (como os roteadores para o *Wi-fi* e *switches* para a Ethernet), que podem variar a depender da infraestrutura do sistema. Segundo Santos et al. (2016), a criação do *Wi-fi* não envolveu uma preocupação com dispositivos que possuem consumo energético limitado, sendo essa sua principal desvantagem. Ainda, o autor menciona que o consumo energético do 4G também é alto, porém, é um problema compensado pela cobertura em locais afastados.

Apesar da Ethernet apresentar um consumo baixo de energia, o *ZigBee* e o BLE foram projetados para possuir essa funcionalidade, sendo eles, dentre os comparados, os mais econômicos. A Tabela 5 apresenta o comparativo das tecnologias analisadas no quesito de consumo energético.

3.5 Custos

Restrições orçamentárias são muito comuns em sistemas de monitoramento, tornando a comparação de custos entre os meios de comunicação essencial para a escolha da solução mais viável. O custo engloba o investimento inicial de infraestrutura e equipamen-

Tabela 5 – Comparativo de consumo energético

Tecnologia	**Consumo energético médio**	**Observação**
Wi-Fi	Alto	Varia conforme utilização
ZigBee	Muito baixo	–
BLE	Muito baixo	–
4G	Alto	Varia conforme utilização
Starlink	Muito alto	Varia conforme utilização
Ethernet	Baixo	–

Fonte: Elaborado pela autora.

tos e, ainda, custos operacionais, como manutenção e consumo de energia. Além disso, questões técnicas, econômicas e de logística também devem ser levadas em consideração. A escolha de uma tecnologia mais cara, mas robusta e confiável, pode reduzir custos futuros com manutenção corretiva e evitar falhas críticas, enquanto soluções mais econômicas exigem atenção redobrada à operação e logística, de modo a garantir a continuidade e qualidade da coleta de dados. Em resumo, a análise deve ser mais aprofundada para cada caso, portanto, também não é viável generalizar um valor para cada tecnologia.

Quando se trata de custo, a *Starlink* é o meio de comunicação mais oneroso dentre as tecnologias analisadas. Isso se deve tanto ao investimento inicial elevado (aquisição da antena e roteador) quanto à necessidade de manter um plano de dados mensal ativo. Embora o *Wi-Fi* e o 4G LTE também dependam de planos de dados, seus custos de implementação são menores (o custo inicial do *Wi-fi* pode aumentar significativamente se não existir uma rede local prévia). Apesar disso, vale ressaltar que o custo operacional depende do uso.

A Ethernet, por não exigir a manutenção de um plano de dados, se torna uma das opções mais econômicas a longo prazo, apesar de necessitar de um investimento inicial em infraestrutura cabeada, que é compensado pela baixa manutenção e estabilidade da comunicação. Como cita Santos et al. (2016), a Ethernet se popularizou justamente por sua facilidade de manutenção e custo, boa adaptação e simplicidade.

Paralelamente, o *ZigBee* e o BLE também são tecnologias de baixo custo e não necessitam de manutenção de plano de dados. Como também não exigem de infraestrutura cabeada, se tornam inclusive mais econômicos que a Ethernet. A Tabela 6 mostra de forma mais didática essa comparação.

Tabela 6 – Comparativo de custos

Tecnologia	**Custo médio**	**Observação**
Wi-Fi	Alto	Diminui se já houver rede local, depende de plano de dados
ZigBee	Muito baixo	–
BLE	Muito baixo	–
4G	Alto	Depende de plano de dados
Starlink	Muito alto	Depende de plano de dados e alto investimento inicial
Ethernet	Baixo	Investimento inicial médio

Fonte: Elaborado pela autora.

3.6 Tempo de implementação

Devido a legislação existente sobre o monitoramento de barragens, os prazos legais são determinantes para o desenvolvimento de um projeto. Por isso, o tempo de implementação de uma tecnologia pode ser um fator decisivo na escolha do meio de comunicação a ser adotado. Assim como os custos, o tempo de implementação requer uma análise mais aprofundada de cada caso, considerando que tipo de infraestrutura já existe no local da barragem, a disponibilidade de mão de obra qualificada, a complexidade da instalação de equipamentos, a necessidade de integração com sistemas de monitoramento pré-existentes e as condições logísticas e ambientais que possam afetar o ritmo de implementação.

Para implementar, a Ethernet é a tecnologia que demanda mais tempo. Isso porque é necessário realizar uma infraestrutura completa de cabeamento para que a rede funcione. O *Wi-fi* e a *Starlink* podem ter tempos de implementação semelhantes, pois ambos exigem apenas a instalação de um roteador (no caso do *Wi-fi*) ou de uma antena e modem (no caso da *Starlink*). O trabalho de Laroca (2017) mostra o processo completo de instalação de uma rede cabeada Ethernet, e também mostra a instalação e configuração de um roteador, sendo a exemplificação de que a implementação da rede Ethernet é, de fato, mais complexa e demorada.

A rede 4G, o *ZigBee* e o BLE são as tecnologias com menor tempo de implementação dentre os meios de comunicação comparados. Além de serem *wireless*, ou seja, não dependem de cabeamento, normalmente exigem menos dispositivos para compor o sistema de comunicação, resultando em menor tempo de implementação e configuração. A Tabela 7 apresenta o comparativo das tecnologias em relação ao tempo de implementação.

Tabela 7 – Comparativo de tempo de implementação

Tecnologia	**Tempo de implementação**	**Observação**
Wi-Fi	Médio	Varia conforme quantidade de dispositivos
ZigBee	Baixo	Wireless com poucos dispositivos
BLE	Baixo	Wireless com poucos dispositivos
4G	Baixo	Wireless com poucos dispositivos
Starlink	Médio	Varia conforme quantidade de dispositivos
Ethernet	Muito alto	Infraestrutura física de cabeamento

Fonte: Elaborado pela autora.

3.7 Tabela comparativa

Após realizar a comparação entre os meios de comunicação *Wi-fi*, *ZigBee*, BLE, 4G, Starlink e Ethernet considerando os critérios alcance/cobertura, confiabilidade da comunicação, velocidade, consumo de energia, custos e tempo de implementação, foi possível elaborar a Tabela 8, um apanhado geral da comparação. Vale destacar que os dados apresentados nesta tabela referem-se especificamente ao contexto de monitoramento geotécnico automatizado de barragens. Portanto, sua aplicação em outros cenários exige uma análise comparativa prévia, a fim de verificar a adequação das informações às novas condições. Além disso, é importante ressaltar que a compilação apresentada na Tabela 8 não é uma recomendação. Trata-se, pois, de um resumo da análise apresentada neste estudo comparativo para fins didáticos.

Tabela 8 – Comparativo total

Tecnologia/ Critério	**Wi-Fi**	**ZigBee**	**BLE**	**4G**	**Starlink**	**Ethernet**
Alcance e cobertura	250 m	Até 100 m	Até 50 m	5 Km	70-240 m	2 Km
Confiabilidade da comunicação	Sujeito a interferências externas	Alcance curto	Limitado pelo alcance máximo	Depende da cobertura da operadora	Confiável com boa visada para o céu	Cabeada, imune a interferências eletromagnéticas
Velocidade (Taxa de transmissão e latência)	600 Mbps 5-30 ms	250 Kbps 80-130 ms	1 Mbps 6 ms	50 Mbps 20-50 ms	8-25 Mbps 20-60 ms	100 Mbps 1 ms
Consumo de energia	Alto	Muito baixo	Muito baixo	Alto	Muito alto	Baixo
Custos	Alto	Muito baixo	Muito baixo	Alto	Muito alto	Baixo
Tempo de implementação	Médio, varia conforme quantidade de dispositivos	Baixo, poucos dispositivos	Baixo, poucos dispositivos	Baixo, poucos dispositivos	Médio, varia conforme quantidade de dispositivos	Muito alto, devido a infraestrutura física de cabeamento

Fonte: Elaborado pela autora.

4 Resultados e Considerações Finais

Tendo em vista o objetivo geral deste trabalho, que consiste em realizar um comparativo entre diferentes formas de comunicação aplicadas ao monitoramento automático de barragens, os resultados apresentados a seguir buscam evidenciar as vantagens e limitações de cada tecnologia frente a critérios técnicos previamente estabelecidos, conforme analisados no Capítulo 3. A análise comparativa dos meios de comunicação demonstrou que não existe uma solução única ideal para o monitoramento de barragens, mas sim meios de comunicação mais adequados a diferentes contextos de aplicação.

É importante ressaltar que os quesitos utilizados para a comparação, como alcance/cobertura, confiabilidade da comunicação, velocidade, consumo de energia, custos e tempo de implementação não têm o mesmo peso para todos os projetos de monitoramento. Em ambientes críticos como barragens, a confiabilidade dos dados é o parâmetro mais importante dentre os citados. Isso porque a falha em um dado de monitoramento pode comprometer a segurança da barragem e levar a catástrofes, como a de Brumadinho. Os demais critérios podem ser ponderados a depender do projeto de automação e da empresa responsável pela barragem. Para uma organização com mais capital, o tempo de implementação pode ser mais importante do que os custos. Já para uma empresa com foco em sustentabilidade, o consumo de energia pode ser o fator decisivo. Por isso, a escolha da tecnologia deve levar em consideração não só o contexto geotécnico, mas também a realidade operacional e estratégica da empresa.

Entre as tecnologias analisadas, a Ethernet se destaca como a mais confiável. Além disso, ela também é uma opção de baixo custo e baixo consumo energético. Sua grande desvantagem é o alto tempo de implementação, mas, ainda assim, por oferecer a maior confiabilidade de dados, é recomendada como primeira opção sempre que as condições do ambiente permitirem sua instalação.

Há situações em que não é possível o cabeamento de uma rede, seja por falta de infraestrutura ou pela localidade muito remota, ou até mesmo pelas condições do ambiente não serem favoráveis para tal. Nesse caso, deve-se considerar as demais opções. Dentre elas, o *Wi-fi* é o que possui menor cobertura em locais remotos, portanto, o 4G e a Internet Satelital são opções mais viáveis. Considerando o custo, o 4G tem uma grande vantagem sobre a *Starlink*, sendo essa mais indicada em ambientes em que não há cobertura suficiente de operadoras para o bom funcionamento do 4G. Ainda, caso seja comprovado que o *Wi-fi* possui boa cobertura no local, ele pode ser igualmente indicado com o 4G, sendo que a Internet Satelital ainda permanece como última alternativa devido ao alto custo de implementação.

O *ZigBee* e o BLE não são comumente recomendados para conexão entre *gateway* e servidor, mas sim para conexão entre *dataloggers*/sensores e *gateway*. Isso se deve principalmente às baixas taxas de transmissão de dados e aos alcances bastantes limitados, como mencionado na seção 2.6.2. Normalmente, o *gateway* e o CMG, onde o servidor está localizado, ficam bem distantes entre si, dificultando a utilização desses meios para sua integração. Além disso, as tecnologias citadas são suscetíveis a sofrerem muitas interferências e, por não serem criptografadas, podem prejudicar a confiabilidade dos dados de monitoramento.

De forma geral, conclui-se que não há um meio de comunicação adequado para o monitoramento geotécnico, mas sim situações que podem favorecer um meio ou outro. Uma prática muito comum em ambientes de mineração e sistemas com alta criticidade é a redundância do sinal de transmissão. Por isso, muitos dos projetos de monitoramento incluem mais de uma tecnologia em seu escopo. A título de exemplo, o artigo de Salomão e Melo (2023) destaca a importância da redundância da transmissão dos dados. Na barragem em questão, o primeiro meio de comunicação adotado foi a rede corporativa (Ethernet), mas o sistema conta com redundância 3G e internet satelital. Essa estratégia visa aumentar a confiabilidade do sistema, assegurando a continuidade da transmissão de dados mesmo em caso de falha de uma das tecnologias empregadas.

Portanto, conclui-se que o estudo se fez relevante porque facilitou o entendimento das tecnologias de comunicação e suas principais vantagens e desvantagens, e cumpriu o objetivo proposto de entender a influência de cada meio de comunicação na aplicação de monitoramento de barragens.

Por fim, ressalta-se que este estudo possui caráter estritamente didático, não devendo ser interpretado como orientação técnica ou recomendação profissional. A motivação aqui é exclusivamente acadêmica, voltada à demonstração de competências e à consolidação dos conteúdos abordados durante a formação em Engenharia de Controle e Automação.

Referências

ALBINI, Luiz Carlos Pessoa. In: REDES de Computadores I. 1. ed., 2017. Citado 2 vezes nas páginas 41, 43.

ANM. *Report Mensal Barragens de Mineração*. Report mensal fornecido pela ANM no mês de agosto sobre a situação atual das barragens de mineração. Agência Nacional de Mineração. Ago. 2024. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/boletim-de-barragens-de-mineracao/boletim-mensal-agosto-2024#:~:text=No%20dia%2001%2F09%2F2024,o%20gr%C3%A1fico%20da%20Figura%201.. Citado 1 vez nas páginas 19, 20.

ANM. *Resolução Nº 13, DE 8 DE agosto DE 2019*. Resolução Nº 13, DE 8 DE agosto DE 2019 publicada pela ANM no Diário Oficial da União. Agência Nacional de Mineração. Ago. 2019. Disponível em: https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-13-de-8-de-agosto-de-2019-210037027. Citado 3 vezes nas páginas 21–23.

BADHIYE, Sagarkumar S.; CHATUR, Dr. P. N.; WAKODE, B. V. Data Logger System: A Survey. *National Conference on Emerging Trends in Computer Science and Information Technology (NCETCSIT-2011)*, 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Sagarkumar-Badhiye/publication/271964052_Data_Logger_System_A_Survey/links/54d77a180cf25013d038e1dc/Data-Logger-System-A-Survey.pdf. Citado 2 vezes na página 32.

BARROS, Emanoel Guilherme. Acesso sem controle a internet: Uma abordagem com engenharia social atraves de wireless fidelity (wifi). *Monumenta - Revista Científica Multidisciplinar*, v. 2, n. 1, p. 59–63, mar. 2021. Disponível em: https://revistaunibf.emnuvens.com.br/monumenta/article/view/41/23. Citado 1 vez na página 34.

BASTOS, João; AFONSO, Pedro. O Impacto do Trabalho por Turnos no Sono e Saúde Psíquica. *Revista Portuguesa de Psiquiatria e Saúde Mental*, v. 6, n. 1, p. 24–30, jun. 2020. Disponível em: https://www.revistapsiquiatria.pt/index.php/sppsm/article/view/101/56. Citado 1 vez na página 14.

BORTOLLI, Lucas Piovezan. *Sensoriamento Remoto Para Monitorar Risco De Ruptura De Barragens*. 2025. Bacharel em Engenharia Eletrônica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em: https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/36529/1/sensoriamentoremotorupturabarragens.pdf. Acesso em: 31 ago. 2024. Citado 2 vezes nas páginas 25, 30.

BRASIL. *Lei Nº 14.066, de 30 de setembro de 2020*. Lei 14.066, de 30 de setembro de 2020 emitida pelo presidente Jair Messias Bolsonaro. Set. 2020. Disponível em: https:

//www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14066.htm. Citado 1 vez na página 24.

BRASIL. *Lei Nº 12.334, de 20 de setembro de 2010*. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010 emitida pelo presidente Luiz Inácio Lula da Silva. Set. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm. Citado 1 vez na página 13.

CAMPBELL SCIENTIFIC. *CR310 - Datalogger da Campbell Scientific*. Campbell Scientific. 2024. Disponível em: https://www.campbellsci.com.br/cr310. Citado 1 vez na página 33.

CAMPOS, Renan Landim et al. Estado da Arte em Monitoramento Geotécnico de Deslocamento para Barragens e Estruturas de Mineração. *XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, set. 2020. DOI: https://doi.org/10.4322/cobramseg.2022.0126. Citado 2 vezes nas páginas 25, 30.

CARDOZO, F. A. C.; PIMENTA, M. M.; ZINGANO, A. C. Métodos Construtivos De Barragens De Rejeitos De Mineração – Uma Revisão. *HOLOS*, dez. 2016. DOI: 10.15628/holos.2016.5367. Disponível em: https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/5367/pdf. Citado 1 vez nas páginas 21–23.

CEDOM, Centro de Documentação e Memória do Mercado Segurador. *Dia Mundial do Meio Ambiente*. Seis desastres que precederam ao ocorrido em Brumadinho. Confederação Nacional das Seguradoras. 2025. Disponível em: https://cedom.cnseg.org.br/curiosidades/dia-mundial-do-meio-ambiente/. Citado 1 vez na página 12.

CHAUDHARI, Bharat S.; ZENNARO, Marco; BORKAR, Suresh. LPWAN Technologies: Emerging Application Characteristics, Requirements, and Design Considerations. *Future Internet*, mar. 2020. DOI: 10.3390. Disponível em: https://doi.org/10.3390/fi12030046. Citado 1 vez na página 34.

CLEMENTE, Beatriz et al. Vazões Percoladas Em Barragens De Mineração E A Importância Do Seu Monitoramento Para Detecção De Erosão Interna. *XXXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens*, p. 16, ago. 2023. Disponível em: https://cbdb-web-uploads.s3.amazonaws.com/system/uploads/ckeditor/attachments/1380/049_-_Vaz%C3%B5es_Percoladas_em_Barragens_de_Minera%C3%A7%C3%A3o_e_a_Import%C3%A2ncia_do_seu_Monitoramento_para_Detec%C3%A7%C3%A3o_de_Eros%C3%A3o_Interna.pdf. Citado 1 vez na página 28.

CONTROLES, Blaster. *Medidor de Vazão Tipo Calha Parshall - Blaster Controles*. Blaster Controles. 2025. Disponível em: https://www.blastercontroles.com.br/produtos/medidor-de-vazao/medidor-de-vazao-tipo-calha-parshall/. Acesso em: 28 jul. 2025. Citado 1 vez na página 28.

CUNHA, Evandro Fernandes da et al. Sistema De Transmissão De Dados De Vento E Onda, Via Rádio Telemetria, Em Lagos De Barragens. *XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 2009. Disponível em: https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/110/12f12e477f184cd725bb395215110528_d8a4774520897bdf16a0218abedcd0db.pdf. Citado 1 vez na página 32.

CURTO CIRCUITO. *Módulo BLE*. Módulo BLE. Curto Circuito. 2025. Disponível em: https://curtocircuito.com.br/modulo-bluetooth-ble-5-0-ibeacon-mesh-jdy-24m.html?srsltid=AfmBOoorY9u-qNzv2etKTqtbUaVCFegvVOyCCC_GifZmPy3qipLI_P7e. Citado 1 vez na página 38.

DIAS, Marcus Vinícius Lima. *Avaliação da Segurança de Barragens por meio da Análise de Instrumentação Geotécnica*. 2017. Graduação em Engenharia Civil – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Disponível em: https://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/397/1/MONOGRAFIA_Avalia%c3%a7%c3%a3oSeguran%c3%a7aBarragens.pdf. Acesso em: 25 ago. 2024. Citado 3 vezes nas páginas 24, 25.

DOMINGUES, Gustavo Fernandes. História da Mineração no território brasileiro: uma análise dos tratados políticos que legislam a atividade mineradora (1934-1967). *Revista Ensaios de História*, v. XXIII, n. 1, p. 136–151, 2022. Disponível em: https://ojs.franca.unesp.br/index.php/ensaiosdehistoria/article/download/3881/3261/14281. Citado 3 vezes nas páginas 12, 18.

DUARTE, Anderson Pires. *Classificação Das Barragens De Contenção De Rejeitos De Mineração E De Resíduos Industriais No Estado De Minas Gerais Em Relação Ao Potencial De Risco*. 2008. Pós-Graduação Em Saneamento, Meio Ambiente E Recursos Hídricos – Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais. Disponível em: https://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/502M.PDF. Acesso em: 23 ago. 2024. Citado 1 vez na página 20.

DUTRA, Joao V. C. P. et al. Estudo do Protocolo de Comunicac¸ao Zigbee. *Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel*, 2022. Disponível em: https://inatel.br/csilab/documents/4-estudo-do-proto.pdf. Citado 2 vezes na página 37.

E-SPACE. *E-SPACE: Bridging Earth and Space*. E-Space. 2025. Disponível em: https://www.e-space.com/. Citado 1 vez na página 40.

FERREIRA, Hudson de Oliveira. *Análise Bibliográfica: Dificuldades De Transmissão Via Satélite E Rádio Em Municipios Do Amazonas*. 2021. Tecnólogo em Sistemas de Telecomunicações – Instituto Federal do Amazonas. Disponível em: http://repositorio.ifam.edu.br/jspui/bitstream/4321/1040/1/An%c3%a1lise%20bibliogr%c3%a1fica%20-%20dificuldades%20de%20transmiss%c3%a3o%20via%20sat%c3%a9lite%20e%20r%c3%a1dio%20em%20munic%c3%adpios%20do%20Amazonas_Ferreira_2021.pdf.pdf. Acesso em: 19 jul. 2024. Citado 1 vez na página 39.

FERREIRA, Pamela Lisboa et al. Visão Geral das Principais Instrumentações Utilizadas no Acionamento Automático de Sirenes de Barragens de Mineração. *XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, set. 2024. Citado 1 vez na página 31.

FERTIG, Katharine Schaeffer. *Redes Industriais: Wi-Fi X IEEE 802.15.4 Uma análise comparativa no monitoramento de paradas de máquinas*. 2018. Graduação em Engenharia de Telecomunicações – Instituto Federal de Santa Catarina. Disponível em: https://wiki.sj.ifsc.edu.br/images/2/2f/Projeto_de_TCC_Katharine_v1.0.pdf. Acesso em: 3 jul. 2024. Citado 1 vez na página 35.

FIGUEIROA, Silvia F. de M. "Mineração No Brasil: Aspectos Técnicos E Científicos De Sua História Na Colonia E No Império (Séculos XVIII-XIX). *Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)*, 1997. Disponível em: https://www.acuedi.org/ddata/570.pdf. Citado 2 vezes nas páginas 12, 18.

FONSECA, Murilo L. et al. Proposta de uma arquitetura para sistemas de monitoramento de segurança de barragens. *CBA 2022 - Congresso Brasileiro de Automática*, 2022. Disponível em: https://www.sba.org.br/cba2022/wp-content/uploads/artigos_cba2022/paper_3506.pdf. Citado 1 vez na página 14.

FOROUGHI, Tabesh. *Evaluation of 10G Ethernet under various environments*. 2024. Master of Computing – Unitec Institute of Technology. Disponível em: https://www.researchbank.ac.nz/server/api/core/bitstreams/3ed8cfcd-7eae-4472-965a-79c614bf86ed/content. Acesso em: 19 jul. 2024. Citado 1 vez na página 43.

GEOKON. *Vertical In-Place Inclinometer System (MEMS)*. Geokon. 2025. Disponível em: https://www.geokon.com/6180. Citado 1 vez na página 29.

GOMES, Ruan Delgado; ALENCAR, Marcelo; FONSECA, Iguatemi. Desafios de Redes de Sensores sem Fio Industriais. *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação*,v.4, p. 16–27, jul. 2013. DOI: 10.12721/2237-5112.v04n01a03. Citado 1 vez na página 37.

GROUNDPROBE. *RGR-Velox*. GroundProbe. 2025. Disponível em: https://www.groundprobe.com/product/rgr-velox/. Citado 1 vez na página 31.

GUNATHILAKE, Nilupulee; AL-DUBAI, Ahmed Yassin; BUCHANAN, William J. Internet of Things: Concept, Implementation and Challenges. *International Conference on IoT and its Applications*, p. 10, dez. 2020. Citado 1 vez nas páginas 35, 36.

HUI, Li et al. Sub-1 GHz Network-Based Wireless Bridge-Monitoring System: Feature and Verification. *Tech Science Press*, nov. 2021. DOI: 10.32604. Citado 1 vez na página 44.

IDC TECHNOLOGIES. *Process Control, Automation, Instrumentation and SCADA*. London: IDC Technologies e Bookboon, 2012. P. 99. Livro disponível gratuitamente em bookboon.com. Citado 1 vez na página 34.

IEEE STANDARDS ASSOCIATION. *Ethernet's Next Big Role: Bringing Determinism to Networking*. Artigo sobre o futuro da Ethernet e aplicações em redes determinísticas. IEEE Standards Association. 2024. Disponível em: https://standards.ieee.org/beyond-standards/ethernets-next-bar/. Citado 1 vez na página 43.

IPEA. *Implementação da Tecnologia 5G no Contexto da Transformação Digital e Indústria 4.0*. Jan. 2021. Disponível online. Disponível em: https://portalantigo.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=37360&catid=191&Itemid=8. Citado 1 vez na página 44.

JOSE, Rodriguez Pisco Roberto. *Estudio Comparativo Entre Los Proyectos Internet Satelital Starlink Y Kuiper*. 2022. Graduação em Engenharia de Sistemas – Facultad De Administración Y Finanzas E Informática, Universidad Técnica De Babahoyo. Disponível em: http://190.15.129.146/bitstream/handle/49000/13104/E-UTB-FAFI-SIST-000403.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 8 set. 2024. Citado 1 vez na página 40.

JPROLAB. *Pluviômetro Ville de Paris da fabricante JProlab*. JProlab. 2025. Disponível em: https://www.jprolab.com.br/pluviometro-ville-de-paris-capacidade-125-mm-400-cm2. Citado 1 vez na página 29.

JUNIOR, Nelson Luiz Zucheratto. *Revisão Bibliográfica Sobre Segurança Em Barragens De Terra Por Meio De Instrumentação Geotécnica*. 2021. Graduação em Engenharia de Controle e Automação – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Disponível em: https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/3813/3/MONOGRAFIA_Revis%c3%a3oBibliogr%c3%a1ficaSeguran%c3%a7a.pdf. Acesso em: 2 jul. 2024. Citado 1 vez na página 27.

JUNIOR, T. F. Souza; MOREIRA, E. B.; HEINECK, K. S. Barragens De Contenção De Rejeitos De Mineração No Brasil. *HOLOS*, v. 05, p. 1–39, nov. 2018. DOI: 10.15628/holos.2018.7423. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/187208/001082176.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Citado 4 vezes nas páginas 12, 18, 19, 23.

LAROCA, Juliano Gavronski. *Estudo De Caso De Implementação De Uma Rede Local*. 2017. Tecnólogo em Análise e Desenvolvimento de Sistemas – Universidade Tecnológica Federal Do Paraná. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/16795/2/PG_COADS_2017_2_01.pdf. Acesso em: 24 jul. 2024. Citado 1 vez na página 50.

LIMA, Victória et al. Análise De Deslocamentos Superficiais Por InSAR E ETR, Estudo De Caso Em Barragem De Rejeitos. *XXXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens*, abr. 2023. Citado 1 vez na página 31.

MACHADO, William Gladstone de Freitas. *Monitoramento de Barragens de contenção de Rejeitos de Mineração*. 2007. Mestrado em Engenharia Mineral – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-31032008-154124/publico/DissertacaoWillianGladstoneMachado.pdf. Acesso em: 10 ago. 2024. Citado 8 vezes nas páginas 12, 14, 20–22, 25, 27, 32.

MANSUR, Rafaela. *Quatro anos da tragédia em Brumadinho: 270 mortes, três desaparecidos e nenhuma punição*. G1 Minas. Jan. 2023. Disponível em: https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2023/01/25/quatro-anos-da-tragedia-em-brumadinho-270-mortes-tres-desaparecidos-e-nenhuma-punicao.ghtml. Citado 1 vez na página 19.

MEDENICA, Igor et al. Optimization of Delay Time in ZigBee Sensor Networks for Smart Home Systems Using a Smart-Adaptive Communication Distribution Algorithm. *MDPI Electronics*, ago. 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/electronics14153127. Citado 1 vez na página 36.

MOKO SMART. *Bluetooth VS Bluetooth Low Energy: A Detailed Comparison*. Moko Smart. 2023. Disponível em: https://www.mokosmart.com/bluetooth-vs-bluetooth-low-energy-a-detailed-comparison/. Citado 1 vez na página 38.

MONTEIRO, Bruno Oliveira. *Sensores Virtuais Baseados Em Aprendizado De Máquina Para Estimativa De Valores De Sensores Em Instrumentação Básica De Barragens De Rejeito*. 2023. Mestre em Engenharia de Controle e Automação – Pós Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração - PROFICAM, Escola de Minas, Universidade Fererederal de Ouro Preto, Associação Instituto Tecnológico Vale - ITV. Disponível em: https://www.itv.org/wp-content/uploads/2023/12/Dissertacao-Bruno-Oliveira-Monteiro.pdf. Acesso em: 12 ago. 2024. Citado 1 vez na página 32.

MOREIRA, Milene Santos. *Estudo do Padrão de Comunicação Ethernet-APL*. 2024. Mestre em Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Itajubá. Disponível em: https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/bitstream/123456789/4140/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o_2024120.pdf. Acesso em: 19 jul. 2024. Citado 1 vez na página 41.

MVNO INDEX. *The Latency of the different Mobile Networks*. MVNO Index. 2025. Disponível em: https://mvno-index.com/the-latency-of-the-different-mobile-networks/. Citado 1 vez na página 44.

NÓBREGA, Isac. *O que podemos aprender com a catástrofe de Brumadinho*. Sobrevoo da área atingida pelo rompimento da barragem em Brumadinho (MG). Nações Unidas Brasil. 2019. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/82492-artigo-o-que-podemos-aprender-com-cat%C3%A1strofe-de-brumadinho. Citado 1 vez na página 13.

O'FARRELL, Patrick; KHADYE, Aniruddha. *Latency in Factory Automation*. Texas Instruments. 2019. Disponível em: https://www.ti.com/lit/an/snla240a/snla240a.pdf. Citado 1 vez na página 44.

OJOPE, Fred Richard Maciel. *Evolução Das Redes Móveis E Transição Perfeita Para 5G*. 2024. Tecnólogo em Sistemas de Telecomunicações – Instituto Federal do Amazonas. Disponível em: http://repositorio.ifam.edu.br/jspui/bitstream/4321/1504/1/EVOLU%c3%87%c3%83O%20DAS%20REDES%20M%c3%93VEIS%20E%20TRANSI%c3%87%c3%83O%20PERFEITA%20PARA%205G_OJOPE_2024.pdf. Acesso em: 19 jul. 2024. Citado 2 vezes nas páginas 38, 44.

OLIVEIRA, Sérgio de. In: PRATES, Rubens (Ed.). *Internet Das Coisas com ESP8266, Arduino e Raspberry Pi*. 1. ed. São Paulo: Novatec, 2017. Citado 4 vezes nas páginas 35, 36, 41, 46.

PARK, Seungkeun et al. Deploying Automated Frequency Coordination System for WiFi 6E in South Korea: Challenges and Opportunities. *IEEE*, v. 62, p. 112–118, jan. 2024. DOI: 10.1109/MCOM.001.2300446. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/10401897. Citado 1 vez na página 35.

PASTÓRIO, A. F. et al. Fundamentos de LoRaWAN – Teoria e Prática. *Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)*, 2021. Disponível em: https://tsi.td.utfpr.edu.br/~edson/minicurso/ERRC_2021_LoRaWAN.pdf. Citado 3 vezes nas páginas 33, 36, 38.

PEREIRA, Luís Flávio; BARROS CRUZA, Gabriela de; GUIMARÃES, Ricardo Morato Fiúza. Impactos do rompimento da barragem de rejeitos de Brumadinho, Brasil: uma análise baseada nas mudanças de cobertura da terra. *JEAP - Journal of Environmental Analysis and Progress*, v. 04, n. 02, p. 122–129, fev. 2019. DOI: 10.24221/JEAP.4.2.2019.2373.122-129. Disponível em: https://www.journals.ufrpe.br/index.php/JEAP/article/view/2373/482483023. Citado 2 vezes nas páginas 13, 19.

PIMENTEL, Sérvulo. *Adeus, Musk? Brasil fecha com chinesa SpaceSail e mira fim da Starlink, incluindo áreas remotas e bases militares das Forças Armadas*. Revista Sociedade Militar. 2024. Disponível em: https://www.sociedademilitar.com.br/2024/11/adeus-musk-brasil-fecha-com-chinesa-spacesail-e-mira-fim-da-starlink-incluindo-areas-remotas-e-bases-militares-das-forcas-armadas-sp1.html#google_vignette. Citado 1 vez na página 40.

QORVO. *Wi-Fi Innovation*. Acesso em: 30 jul. 2025. 2023. Disponível em: https://www.qorvo.com/innovation/wi-fi. Citado 1 vez nas páginas 35, 36.

RAMOS, Diego Mendes. *A Importância Da Segurança Da Informação Em Redes Wifi*. 2020. Graduação em Ciências da Computação – Escola de Ciências Exatas e da Computação, Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Disponível em: https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/bitstream/123456789/452/1/TCC%202%20-%20Diego%20Mendes%20Ramos-%20Final.pdf. Acesso em: 2 jul. 2024. Citado 1 vez na página 35.

RODRIGUES, Bruno Oliveira; OLIVEIRA NASCIMENTO, Nilo de. Análise De Parâmetros Em Modelagens De Rupturas De Barragens De Rejeito: Os Casos De Mariana E Brumadinho. *II END - Encontro Nacional de Desastres*, v. II, nov. 2020. Disponível em: https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/133/II-END0104-1-20201122-181327.pdf. Citado 1 vez na página 19.

ROQUE, Dora. *Determinação De Deslocamentos Com Geodesia Insar Para O Controlo De Segurança De Estruturas*. 2016. Doutorado em Engenharia Ciivl – Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Disponível em: https://repositorio.lnec.pt/bitstream/123456789/1009002/2/Rel%20344_16%20dspace.pdf. Acesso em: 31 ago. 2024. Citado 1 vez na página 31.

RST INSTRUMENTS. *Piezômetro de corda vibrante–RST Instruments*. RST Instruments. 2024. Disponível em: https://rstinstruments.com/product/vibrating-wire-piezometer/. Citado 1 vez na página 26.

RST INSTRUMENTS. *RTU L900 - Manual de Instruções*. Manual de instruções da RTU L900, disponível no site oficial. RST Instruments. 2025. Disponível em: https://rstinstruments.com/wp-content/uploads/rstar_instruction-manual.pdf. Citado 1 vez na página 34.

SALOMÃO, Alciene; MELO, Alexandre Vaz de. Automatização Da Instrumentação Civil De Uma Barragem De Terra E Enrocamento: Lições Aprendidas. *XXXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens*, ago. 2023. Citado 1 vez na página 54.

SANTOS, Bruno P et al. Internet das coisas: da teoriaa prática. *Minicursos SBRC-Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuıdos*, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 48, 49.

SANTOS, Luiz Fernando Pereira Dos. Barragens de rejeitos: Considerações gerais do monitoramento e controle. *PGSS Cogna*, 2022. Disponível em: https://repositorio.pgsscogna.com.br/bitstream/123456789/52231/1/Luiz_Fernando_Pereira_dos_Santos.pdf. Citado 1 vez na página 13.

SESTREM, Liamara Paglia. *Concepção E Implantação De Um Plano De Instrumen Tação Para Avaliação Das Condicionantes Geotécni Cas De Uma Encosta Litorânea*. 2012. Mestre em Engenharia de Construção Civil com Área de Concentração em Geotecnia – Curso de Pós Graduação em Engenharia da Construção Civil, Universidade Federal do Paraná. Disponível em: https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/29794. Acesso em: 28 ago. 2024. Citado 5 vezes nas páginas 25–29.

SILICON LABS. *Benchmarking Bluetooth Mesh, Thread, and Zigbee Network Performance*. Silicon Labs. 2025. Disponível em: https://www.silabs.com/wireless/multiprotocol/mesh-performance?. Citado 1 vez na página 36.

SILVA, Márcio Flávio Sousa. *Sistema De Monitoramento Online De Barragens De Mineração*. 2019. Graduação em Engenharia de Controle e Automação – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Disponível em: https://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/1818/11/MONOGRAFIA_SistemaMonitoramentoOnline.pdf. Acesso em: 16 ago. 2024. Citado 7 vezes nas páginas 14, 25–27, 31, 33, 36.

SMIDERLE, Camila de Souza Dahm. *Segurança de barragens: Análise da Instrumentação da Barragem de Itaúba*. 2014. Pós-Graduação em Engenharia Civil – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/115274/000956165.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 2 jul. 2024. Citado 1 vez na página 28.

SOARES, Lindolfo. Barragem de Rejeitos. In: *Tratamento de Minérios*. Trad. Adão B. da Luz, João Alves Sampaio e Silvia Cristina A. França. Rio de Janeiro: CETEM, 2010. P. 831–896. Disponível em: http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/769/1/CCL00410010.pdf. Citado 1 vez na página 12.

SOLINST. *Medidor de Nível de Água 101 - Solinst*. Solinst. 2025. Disponível em: https://www.agsolve.com.br/produto/979/medidor-de-nivel-de-agua-101-solinst. Citado 1 vez na página 27.

SOUZA, Thainá Suzanne Alves. *Evolução Histórica Da Legislação Brasileira E Do Estado De Minas Gerais Relacionado Ao Tema De Disposição De Rejeitos De Mineração Em Barragens*. 2019. Graduação em Engenharia Civil – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Disponível em: https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/2342/1/MONOGRAFIA_Evolu%c3%a7%c3%a3oHist%c3%b3ricaLegisla%c3%a7%c3%a3o.pdf. Acesso em: 25 ago. 2024. Citado 4 vezes nas páginas 23, 24.

SPACEX. *Planos de Serviço da Starlink*. Informações sobre planos de serviço de internet via satélite Starlink. SpaceX. 2025. Disponível em: https://www.starlink.com/br/service-plans?srsltid=AfmBOooLESH43zh5XlyQ0u5A7Ly2tSdvWg-2JJQKyGRpPFtphQbiYpFY. Citado 3 vezes nas páginas 40, 41, 48.

SPACEX. *Starlink*. Antena Starlink performance primeira geração. SpaceX. 2025. Disponível em: https://www.starlink.com/br/support/article/6e57c590-73e5-f061-e71e-cd124f69d0b2?srsltid=AfmBOop7MS8bnRqKZJuR0XZqxZMybjJHeD7ez4bmbvySsdnPIxRVK5vY. Citado 1 vez na página 41.

SVANTEK. *Acelerômetros: um guia completo para aplicações e técnicas em medições de vibração*. Svantek. 2025. Disponível em: https://svantek.com/pt/academia/acelerometro/. Citado 1 vez na página 30.

TORRES, Caio de Castro. *ANÁLISE DE DESEMPENHO DO PROTOCOLO IEEE 802.11*. 2017. Bacharel em Engenharia de Computação – Universidade Estadual do Maranhão.

Disponível em: https://repositorio.uema.br/bitstream/123456789/587/3/TCC-Caio%20Torres_1%20PDF-A.pdf. Acesso em: 22 jul. 2024. Citado 1 vez na página 44.

VDMA. *Technology: WLAN IEEE 802.11n, Wi-Fi 4*. VDMA. 2019. Disponível em: https://www.vdma.eu/documents/34570/129782943/Technology_WLAN%2BIEEE%2B802.11n%2C%2BWi-Fi%2B4.pdf/d0858904-5a8d-9f17-45bd-fe75a4698296?t=1728295136407&. Citado 1 vez na página 45.

VELOSO, Luís Augusto Conte Mendes et al. Projeto De Pesquisa E Desenvolvimento Tecnológico (PD) Para A Automação Da Instrumentação Das Obras Civis Da Uhe Tucuruí. *XXVII Seminário Naional de Grandes Barragens*, set. 2007. Disponível em: https://dynamistechne.com/wp-content/uploads/2015/09/2007-cbdb-projeto-de-pesquisa-e-desenvolvimento-tecnologico-pd-para-a-automacao-da-instrumentacao-das-obras-civis-da-uhe-tucurui.pdf. Citado 1 vez na página 15.

VIEIRA, Rony Anderson Uliana. *Aplicação De Processamento De Imagens No Controle De Planta Modelo: Interoperabilidade Com Controles Industriais Utilizando Comunicação Ethernet*. 2022. Especialista em Sistemas Inteligentes Aplicados a Automação – Instituto Federal do Espírito Santo. Disponível em: https://repositorio.ifes.edu.br/bitstream/handle/123456789/1976/TCC_Aplica%c3%a7%c3%a3o_Processamento_Imagens_Controle_Planta.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 19 jul. 2024. Citado 1 vez na página 41.

WORLDSENSING. *4G Rugged Gateway*. Gateway Edge/Cloud da Worldsensing com tecnologia 4G. WorldSensing. 2025. Disponível em: https://www.worldsensing.com/product/4g-rugged-gateway/. Citado 1 vez na página 44.

WORLDSENSING. *4G Rugged Gateway Cloud - WorldSensing*. WorldSensing. 2024. Dispo- nível em: https://info.worldsensing.com/Datasheet_4GRuggedGatewayCloud_EN?_ga=2.246713862.382555001.1727649616-448256063.1727460567. Citado 1 vez na página 33.

WORLDSENSING. *The 4G rugged gateway - cloud*. WorldSensing. 2024. Disponível em: https://www.worldsensing.com/product/connectivity-gateways-4g-rugged-cloud/. Citado 1 vez na página 15.