

INTERNET DAS COISAS (IoT) NA MINERAÇÃO: APLICAÇÕES PRÁTICAS E SEUS BENEFÍCIOS

INTERNET OF THINGS (IoT) IN MINING: PRACTICAL APPLICATIONS AND BENEFITS

Allan Jackson Gomes de Oliveira^{1*}

Orientadora: Thaíla Ravena Santana Carvalho^{2**}

Coorientador: Emanuel Itaquê de Negreiros Moreira^{3***}

RESUMO

A Internet das Coisas (IoT) tem se destacado nos últimos anos, estabelecendo uma rede com conexão mútua entre objetos que possuem tecnologia empregada, responsável por processar e transmitir dados e informações. Dentro da mineração, essa tecnologia tem sido aplicada em várias fases, desde a pesquisa mineral até o beneficiamento de minérios. Este trabalho tem como objetivo analisar o uso da IoT, abordando tecnologias como o *smart helmets* e a junção de sensores à geossintéticos, abordando a aplicação da IoT em ambientes mineiros, destacando seus benefícios e desafios diante do contexto de transformação digital vivenciado pela Mineração 4.0. O estudo observa a crescente necessidade das mineradoras em aumentar sua produtividade, segurança e sustentabilidade, evidenciando o papel estratégico da IoT como resposta à demanda por operações mais competitivas e sustentáveis. Devido a demanda, é necessário estudar de forma detalhada as aplicações de dispositivos implementados a IoT e identificar quais seriam as limitações, dificuldades. Foi tomado como base trabalhos da área que tratam sobre o assunto e aplicação dessas tecnologias. Foi verificado que o uso da IoT mostra-se eficiente para a análise de grande volume de dados em tempo real, ajudando na tomada de decisão a partir deles. O uso de capacetes inteligentes possibilita o monitoramento em tempo real, além de aumentar a segurança e informações sobre os trabalhadores. Geossintéticos com FO aumentam o nível de monitoramento da estabilidade de estruturas em toda sua extensão, melhorando assim com relação aos métodos convencionais. No entanto, a conectividade em áreas remotas, como no interior do Ceará, representa um empecilho para a implementação da IoT na mineração local, sendo um obstáculo crítico futuro.

Palavras-chave: Internet das Coisas (IoT); tecnologia na mineração; gerenciamento de banco de dados.

ABSTRACT

The Internet of Things (IoT) has gained prominence in recent years by establishing a network of mutual connectivity among objects embedded with technology capable of processing and transmitting data and information. In the mining sector, this technology has been applied at various stages, ranging from mineral exploration to ore processing. This study aims to analyze the use of IoT by addressing technologies such as smart helmets and the integration of sensors into geosynthetics, focusing on the application of IoT in mining environments and highlighting its benefits and challenges within the context of the digital transformation experienced by Mining 4.0. The study observes the growing need for mining companies to increase productivity, safety, and sustainability, emphasizing the strategic role of IoT as a response to the demand for more competitive and sustainable operations. Due to this demand, it is necessary to conduct a detailed analysis of IoT-enabled devices and to identify their limitations and implementation challenges. The study is based on previous research in the field that addresses the topic and the application of these technologies. It was found that the use of IoT proves to be efficient for the analysis of large volumes of data in real time, supporting decision-making processes based on such data. The use of smart helmets enables real-time monitoring, in addition to improving worker safety and providing operational information. Geosynthetics with fiber optics (FO) increase the level of structural stability monitoring along their entire length, thus offering improvements compared to conventional methods. However, connectivity in remote areas, such as the interior of the state of Ceará, represents a major constraint for the implementation of IoT in local mining operations and constitutes a critical future obstacle.

Keywords: Internet of Things (IoT); mining technology; database management.

Data de Submissão: 27/01/2026.

Data de aprovação: 29/01/2026

1*Graduando em Engenharia de Minas pela Universidade Federal do Ceará, allangomes729gmail.com;

2** Professora do magistério superior, Universidade Federal do Ceará - Campus Crateús, thaila.ravena@ufc.br;

3*** Professor do magistério superior, Universidade Federal do Ceará - Campus Crateús, emanuel@crateus.ufc.br.

1 INTRODUÇÃO

A Internet das Coisas, derivado do termo em inglês *Internet of Things (IoT)*, é uma rede digital que conecta objetos físicos, veículos e outros dispositivos que possuem tecnologia empregada. Essas tecnologias são capazes e responsáveis por coletar, processar e transmitir dados em tempo real (ASHTON, 2009).

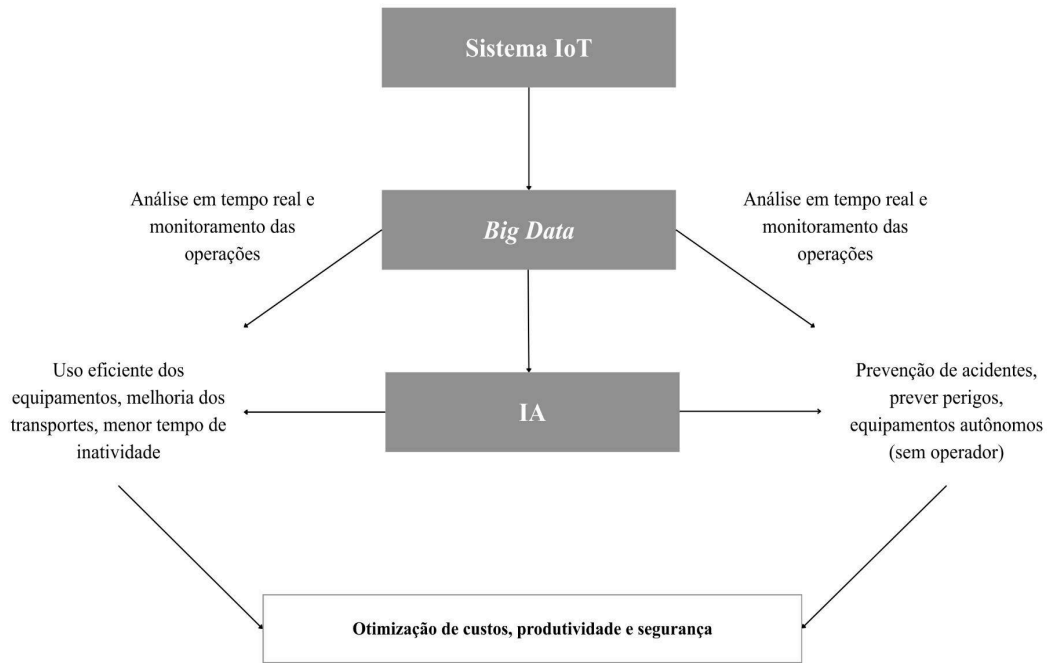
Atualmente, a IoT tem inovado o setor da mineração ao integrar três elementos-chaves para um melhor desempenho dos processos: sensores inteligentes, dispositivos conectados à rede e sistemas que analisam dados em tempo real. Um exemplo dessa aplicação é a possibilidade de monitoramento e descaracterização de barragens em níveis de emergência, que trata-se de um processo técnico pelo qual uma estrutura de contenção de rejeitos ou sedimentos deixa de exercer sua função original, tornando-se estável e segura sem apresentar risco de rompimento (IBRAM, 2021). O uso da IoT nesse contexto, tem como finalidade mitigar e até mesmo evitar que falhas ocorram, reduzindo assim os custos associados à manutenção (IBRAM, 2024).

A implementação dessas soluções inteligentes confirma que a mineração tende a ser cada vez mais automatizada, inteligente e alinhada com a Indústria 4.0. Isso é especialmente visível na etapa de lavra, a qual reúne um conjunto de operações com a finalidade de extrair minérios, integrando etapas envolvendo: fase de planejamento, perfuração, desmonte, carregamento e transporte (CURI, 2017). A eficiência e a segurança dessas operações, somadas à visibilidade econômica, tornam a lavra uma etapa crítica, cujo planejamento e execução exigem o máximo cuidado.

Ao tempo que traz benefícios, Molaei *et al.* (2020) afirma que a implementação da IoT na indústria mineral ainda representa um desafio devido às limitações de infraestrutura em comunicação, gerenciamento e armazenamento de dados. Além disso, muitas empresas de mineração tendem a permanecer utilizando métodos tradicionais ao invés de adotarem novas técnicas, retardando assim o progresso de implementação dessas novas tecnologias no setor.

Com a junção da IoT, entre *Big Data* e Inteligência Artificial (IA) tem permitido otimizar processos mineiros, reduzir custos e, principalmente, aumentar a produtividade na mineração (PEDROSA SANTOS, 2021). Na Figura 01, é ilustrado como funciona essa integração entre os sistemas mencionados de forma prática.

Figura 01- Fluxograma de integração entre sistemas: IoT; *Big Data* e IA.



Fonte: Adaptado de FUTURECOM DIGITAL, 2025 e GEOSTATS, 2026.

Nessa perspectiva, este trabalho tem como objetivo analisar os desafios e os benefícios da integração da Internet das Coisas (IoT) na mineração, abordando aspectos técnicos, operacionais e estratégicos. Serão trazidas e mostradas as ideias e conceitos dessa tecnologia aplicado em alguns segmentos da indústria mineral no setor de lavra, como a prevenção de acidentes, situações de risco e perigos para os trabalhadores, uso de tecnologias implementados com IoT, como o *smart helmets*, e a junção de sensores e geossintéticos. A fim de compreender como essa tecnologia vem sendo aplicada em ambientes de mina, barragens, e assim identificar os principais recursos e dispositivos empregados, além de avaliar quais as dificuldades e as limitações associadas à sua adoção. Além de propor recomendações que favoreçam uma implementação mais eficiente dessa tecnologia no setor mineral.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Conceitos e fundamentos da Internet das Coisas (IoT)

De acordo com Ashton (2009), a Internet das Coisas (IoT) é uma rede de objetos físicos integrados com sensores, *softwares* e conectividade, permitindo a coleta e a troca de dados. Esse

conceito, proposto por Kevin Ashton, destaca a relação de interconexão entre os dispositivos como o centro da IoT.

No âmbito da mineração, essa rede se estende a equipamentos como caminhões, escavadeiras, sensores ambientais de umidade, monitoramento de gases e *wearables*, que são tecnologias vestíveis, como por exemplo coletes de segurança inteligentes.

Stevan Junior (2016) conceitua a IoT como a capacidade de qualquer dispositivo conectado à internet ser identificado através de endereços IP, são números únicos de dispositivos conectados à internet para identificação individual de computadores. Isso permite que diferentes dispositivos se comuniquem entre si, expandindo o conceito de conectividade para objetos físicos do dia a dia equipados com sensores e *softwares*.

Existem alguns elementos básicos que são fundamentais para a utilização da IoT no setor mineral, os quais estão listados na Tabela 1, acompanhados da sua função na mineração e em seguida por um exemplo prático de sua aplicação.

Tabela 1 - Componentes básicos da IoT aplicados à mineração.

Componente	Função	Exemplo
Sensores	Coletar dados físicos (vibração, temperatura)	Sensores de rachaduras em barragens de rejeitos
Redes (Wi-Fi/5G)	Transmissão de dados	Rede <i>mesh</i> subterrânea para túneis de mina
Nuvem	Armazenamento e processamento de dados	Plataformas AWS IoT ou <i>Mining Insights</i>
Análise de Dados	Transformar dados brutos em insights acionáveis	Algoritmos para prever falhas em britadores

Fonte: Adaptado de Ashton (2009), Gubbi et al. (2013) e Lee et al. (2021).

A integração desses quatro componentes permitem que a IoT transforme a mineração em uma atividade mais eficiente, sustentável, segura, e ainda alinhada com os princípios da Indústria 4.0.

2.2 Revoluções Industriais e Mineração

A Primeira Revolução Industrial, iniciada na Inglaterra por volta de 1760, foi marcada pela substituição da manufatura artesanal pela produção mecanizada em larga escala (HOBSBAWM, 1996). Na mineração, esse período foi marcado pelo início da mecanização, com a introdução de bombas e elevadores a vapor (AMARANTE, 2020). A Segunda Revolução Industrial ocorreu entre 1870 e 1914, marcada pelas inovações como a eletricidade, o motor de combustão interna e a produção em massa via linha de montagem de Henry Ford (HOBSBAWM, 1977). Houve uma intensificação da mecanização com a inserção de perfuratrizes elétricas, explosivos como a dinamite e escavações em larga escala (AMARANTE, 2020).

A Terceira Revolução Industrial, a partir da década de 1970, foi embalada pela revolução digital, com a criação de microprocessadores, computadores pessoais, robótica e telecomunicações (TOFFLER, 1980). Observou-se a introdução da automação avançada, modelagem 3D geológica, sensores remotos e perfuratrizes controladas a partir de computadores, amplificando a produtividade. A Quarta Revolução, com o surgimento do conceito de Indústria 4.0 na Alemanha por volta de 2011. Esse movimento foi caracterizado pela integração da IoT, da Inteligência Artificial (IA) e da computação em nuvem (KAGERMANN *et al.*, 2020). Essa integração permitiu que houvesse uma automação nos processos, o que tornou mais prático e rápido a coleta e análise de dados, além de tornar as operações mais seguras, sustentáveis e otimizadas. (IBRAM, 2022).

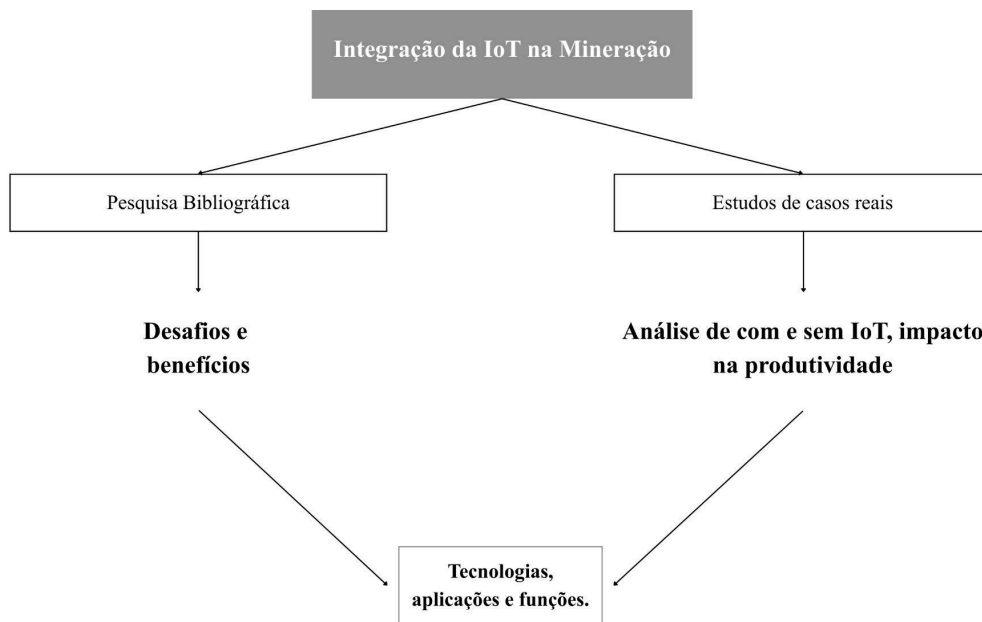
3 METODOLOGIA

O presente trabalho será conduzido por meio de uma pesquisa bibliográfica sobre aplicações de IoT na mineração. A coleta de dados foi realizada em bases acadêmicas como Google Acadêmico, *SciELO*, *Scopus* e *Web of Science*, com critérios bem definidos para assegurar rigor metodológico. Foram selecionados artigos publicados em português e outros idiomas, através das combinações de palavras-chave como: "IoT mineração", "Internet das Coisas mineração", "IoT *mining safety*" e "*smart mining IoT*", priorizando estudos de casos ou aplicações práticas no setor mineral. Considerou-se trabalhos publicados entre 2010 e 2025, focando em estudos direcionados a aplicações práticas em segurança operacional, automação de frotas, ventilação inteligente e monitoramento geotécnico. Como "*IoT Mining Tracking & Worker Safety Helmet*", estudo sobre o funcionamento de capacetes inteligentes, tratando da

parte de *software* e *hardware*. Outro estudo abordado é “Geossintéticos Inteligentes em Barragens: Um Panorama das Inovações no Monitoramento e Prevenção de Riscos”, abordando a aplicação de geossintéticos implementados com IoT para monitoramento com resultados mais rápidos e um alcance maior em informações sobre a estabilidade de toda a estrutura.

A Figura 02 ilustra o fluxograma metodológico indicando as etapas dessa pesquisa, dividindo em pesquisa bibliográfica de artigos técnicos e relatórios que abordam o tema deste trabalho em empresas do setor mineral que utilizam de tais tecnologias. Ao analisar esses dados, foram verificados os impactos da IoT na produtividade e comparados com as operações que fazem ou não o uso dessas tecnologias.

Figura 02- Fluxograma da metodologia da pesquisa: etapas e estratégias de análise.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

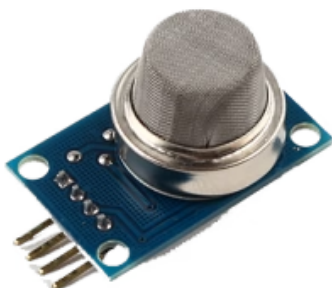
4.1 IoT Nacional

Em alguns estados brasileiros, como Minas Gerais e São Paulo, que concentram grandes empresas mineradoras, como a Vale e a CSN, a IoT é vista como um pilar estratégico da Mineração 4.0. Essas empresas investem em sensores para manutenção preditiva, na automação de frotas e no monitoramento de barragens, com foco principal voltado para a eficiência,

segurança e sustentabilidade, a fim de manter vantagem competitiva no mercado do setor mineral global (IBRAM, 2025).

Pequenas e médias empresas, como a Massari Mineração em São Paulo, iniciaram a adoção de projetos piloto com *wearables*, que tratam-se de equipamentos vestíveis como, por exemplo, cintos com sensores de gás. A Figura 03 ilustra um modelo de sensor, MQ-Series, são sensores com finalidade de detectar vazamentos de gases nocivos, como metano e gás carbônico (ROBOCRAZE, 2022).

Figura 03- MQ-Series.



Fonte: ROBOCRAZE, 2022.

Equipamento com a função de rastreamento dos trabalhadores e análise de *Big Data*, reduzindo acidentes e custos operacionais, embora exista uma grande barreira com a conectividade em áreas remotas (REVISTA MINÉRIOS, 2025). A empresa está em processo de implementação de um projeto para integrar a IoT em sua planta de mineração, com o objetivo de aumentar a segurança dos colaboradores. Aproximadamente 60 funcionários já implementaram sensores de localização, os *wearables*, acoplados aos coletes e aos capacetes, atuando de maneira a armazenar os dados, *Big Data*, a fim de mapear quais são as situações de vulnerabilidade e com isso prever e mitigar acidentes (IBRAM, 2025; ROBBIoT/MICROSOFT, 2025).

No Ceará, especificamente em Fortaleza e sua região metropolitana, a aplicação de IoT na mineração de agregados e rochas ornamentais, como granito, tem grandes possibilidades de uso devido a infraestrutura e geologia regional. O estado possui uma abundância em depósitos acessíveis de granito e agregados em maciços cristalinos (IBRAM, 2025; BRASIL MINERAL, 2024). Devido à proximidade com centros urbanos e infraestrutura portuária, pontos que

facilitam a logística de dados e equipamentos. No entanto, os desafios geotécnicos regionais, como solos arenosos e alta sismicidade, demandam sensores robustos, com maior precisão para o monitoramento de estabilidade de taludes (IBRAM, 2025; BRASIL MINERAL, 2024).

4.2 IoT Mundial

A Rio Tinto, uma das maiores corporações mundiais de mineração, está implementando na região de Pilbara, no oeste australiano, uma frota de caminhões autônomos. (RIO TINTO, 2026). Conhecida como “*Mine of the Future*”, a operação conta com 80 caminhões autônomos controlados através de um sistema automático de carregamento, com o objetivo de carregar e transportar o minério da mina até as usinas, de forma eficiente e segura, sem a necessidade de expor trabalhadores humanos às situações de risco (GLOBAL MINING GUIDELINES GROUP, 2021; KOMATSU, 2024). A companhia pretende expandir a automação para trens e escavadeiras (ALCIRCLE, 2024).

No Canadá, a Goldcorp estendeu sua estratégia de IoT em tempo real para otimizar a ventilação em minas subterrâneas, desenvolvendo o sistema *Ventilation-On-Demand* (VOD) na mina Éléonore.. Esse sistema integra sensores IoT, *tags* RFID em capacetes e veículos, além de rede Wi-Fi subterrânea, detectando as posições dos trabalhadores em tempo real e os níveis de emissões de gases nocivos no ar. Ao identificar a presença de pessoas ou máquinas diesel em uma zona, o sistema de ventiladores é ativado automaticamente, ajustando a velocidade com base no tipo de veículo, como por exemplo aumentando o fluxo para equipamentos com valores altos de emissão de CO, e desligando-os quando conveniente, para economizar energia (CISCO, 2024). Além da melhoria da qualidade do ar, o VOD reduziu o consumo de energia em até 50%, gerando uma economia anual de até US\$ 2,5 milhões, também diminuindo as emissões de gases (MAINTWORLD, 2025; HOWDEN, 2019).

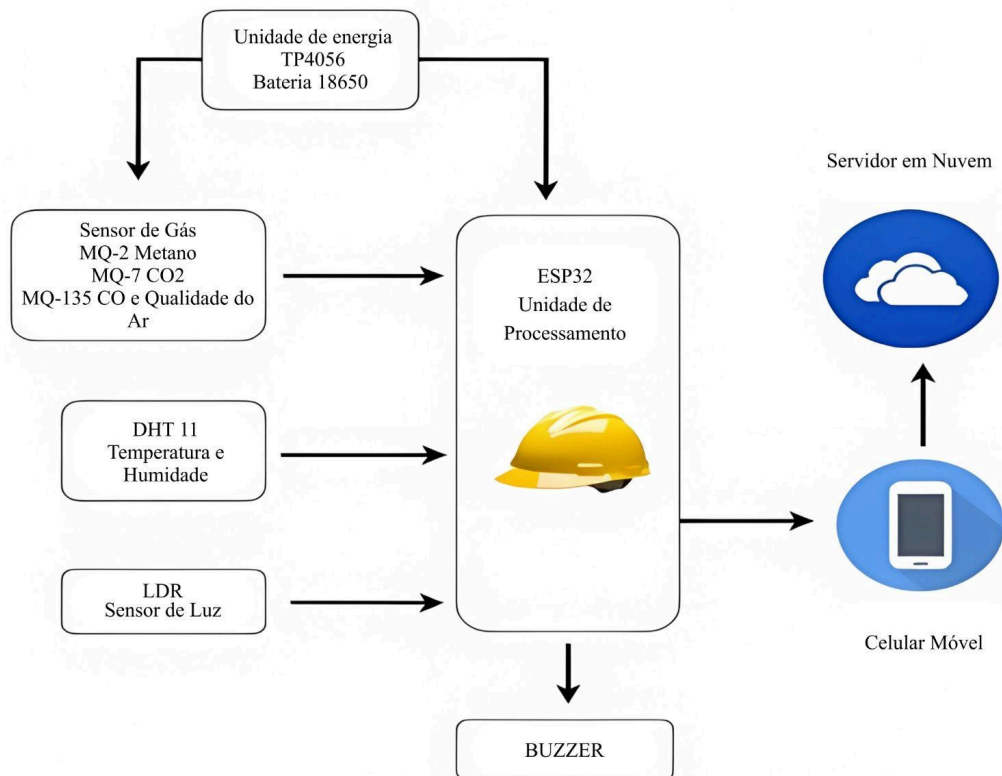
4.3 Smart Helmets

Outro exemplo de avanço na segurança na mineração subterrânea é a implementação de capacetes inteligentes (*smart helmets*), em minas de carvão subterrâneas na Índia, conforme desenvolvido por Vishwakarma *et al.* (2024). O funcionamento ocorre por coleta contínua de dados do ambiente de trabalho e dos trabalhadores expostos a este ambiente. O capacete realiza a transmissão em tempo real para central de controle via rede IoT, ativando alarmes ao exceder níveis aceitáveis de gases específicos, além do armazenamento em nuvem para análises

preditivas (VISHWAKARMA *et al.*, 2024). Apesar dos benefícios em rastreabilidade e resposta rápida, um obstáculo ainda existente é a bateria limitada em turnos longos e necessidade de treinamento para manutenção desses equipamentos.

A Figura 04 detalha a arquitetura geral dos capacetes inteligentes, com unidade de energia, sensores de gás para metano, CO₂, sensores para verificação de qualidade do ar, temperatura, umidade, luz para detecção de visibilidade, acelerômetro, buzzer para emitir alarmes e ESP32 como o processador central, microcontrolador para processamento e comunicação. O sistema é integrado com servidor em nuvem e aplicativo móvel via Arduino (VISHWAKARMA *et al.*, 2024).

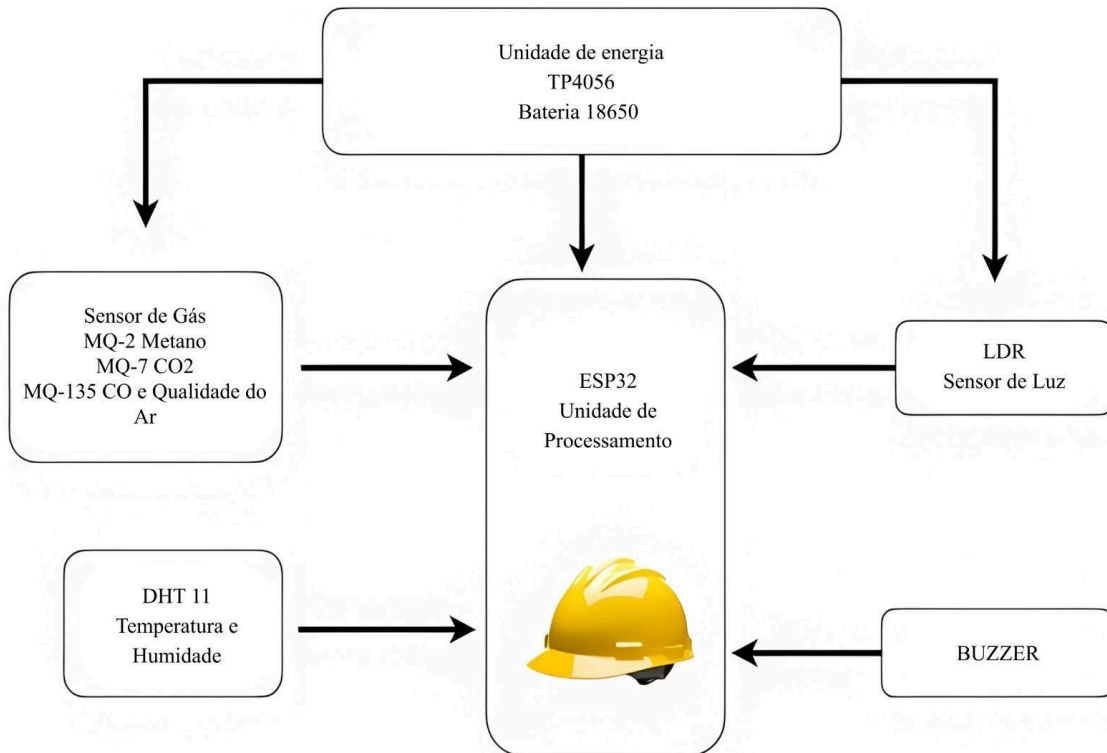
Figura 04- Hardware e software usados em *smart helmets*.



Fonte: Adaptado de VISHWAKARMA *et al.*, 2024.

A Figura 05 detalha o fluxo de *hardware*, onde a bateria alimenta o ESP32, que processa entradas dos sensores de gás, DHT11 e LDR, ativando o buzzer e capacete em caso de anomalias detectadas. (VISHWAKARMA *et al.*, 2024).

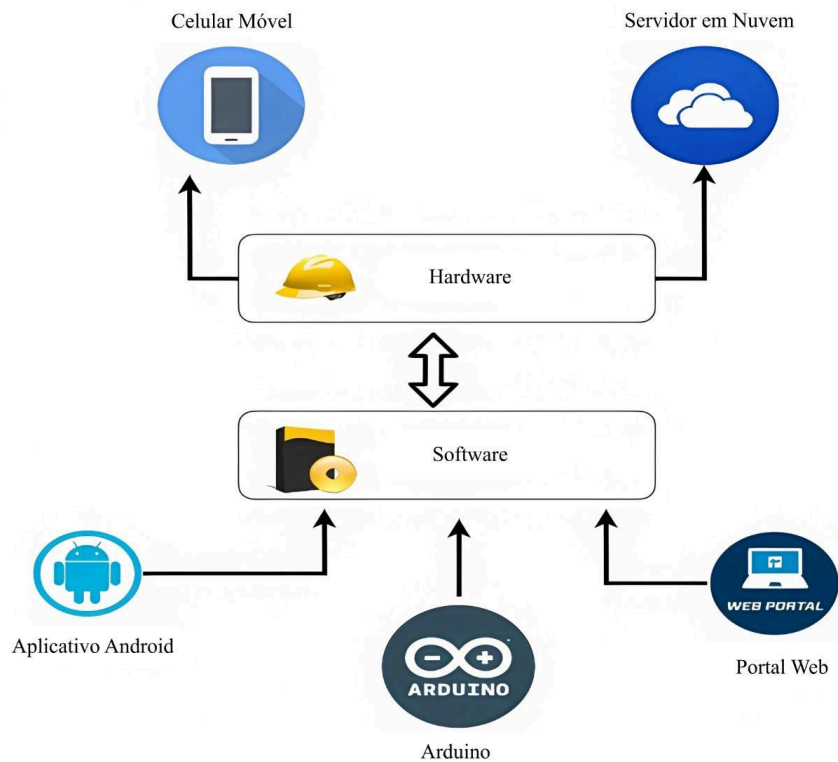
Figura 05- Fluxograma da Seção de Hardware do *smart helmets*.



Fonte: Adaptado de VISHWAKARMA et al. , 2024.

A Figura 06 mostra o fluxo de *software*, com Arduino gerenciando sequência de inicialização, no qual a leitura dos parâmetros pré estabelecidos é realizada pelo aplicativo e a interface do portal *web* transmite os dados, caso haja situações de risco, alertas são emitidos e visualização de maneira remota é ativada. O funcionamento ocorre por captura contínua de dados ambientais, processamento local no ESP32, transmissão para nuvem e geração de alarmes imediatos através do aplicativo nos dispositivos móveis. Com resposta proativa a emergências como vazamentos de gás ou baixa visibilidade, há uma redução de até 40% em acidentes (VISHWAKARMA et al., 2024).

Figura 06- Fluxograma da Seção de Hardware



Fonte: Adaptado de VISHWAKARMA et al. , 2024.

4.4 Geossintéticos e Fibra Óptica

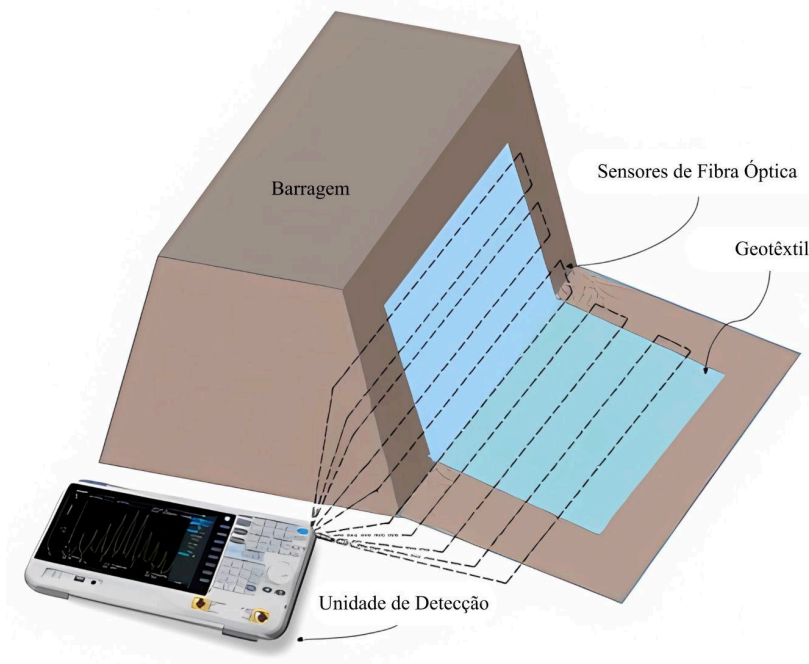
Tratando de geossintéticos, a aplicação de sensores nesses materiais aumentam o controle no monitoramento de estruturas. Os geossintéticos correspondem, nesse contexto, a um conjunto composto por geogrelha que abriga cabos de fibra óptica, coberto por geotêxtil. A junção desses materiais mostrou-se eficaz para monitorar grandes estruturas (NÖTHER, 2012). Os cabos ao serem integrados aos geossintéticos permitem o monitoramento da estabilidade das estruturas, assim, é possível detectar deformações que possam indicar que a segurança está diminuindo. A fibra óptica (FO), empregada para monitoramento em tempo real, é uma alternativa eficiente para a avaliação da segurança estrutural (ACHARYA *et al.*, 2024).

Essa junção apresenta uma elevada precisão na detecção de movimentações ao longo da estrutura, onde são acoplados a geomateriais para antecipar instabilidades em barragens. Para viabilizar esse monitoramento, a fibra óptica é distribuída na estrutura e implementada ao

geotêxtil por meio de pontos de fixação juntamente com os sensores, permitindo a leitura contínua das deformações (ABEDI *et al.*, 2024).

A instalação de um geossintético equipado com sensores de fibra óptica projetado para detectar possíveis deslizamentos em estruturas geotécnicas, como taludes ou barragens, está ilustrada na Figura 07. Observa-se um modelo esquemático de um talude ou encosta, com fibras ópticas distribuídas ao longo do geossintético para monitoramento contínuo de deformações.

Figura 07- Instalação de geossintético baseado em sensor FO.



Fonte: Adaptado de Abedi, 2024.

Enquanto os métodos convencionais detectam apenas variações pontuais, os sensores ópticos integrados permitem o monitoramento contínuo e distribuído das deformações em toda a estrutura, assim prevenindo as possíveis instabilidades com maior precisão e eficiência (Cheng *et al.*, 2025).

A integração da Internet das Coisas (IoT) na mineração representa um avanço significativo no paradigma da Mineração 4.0, permitindo o monitoramento contínuo de parâmetros ambientais, fisiológicos e operacionais em tempo real. Sensores distribuídos em equipamentos pesados, infraestrutura subterrânea e dispositivos vestíveis coletam dados que são

transmitidos via redes *wireless*, como Wi-Fi, BLE, LoRaWAN. Para plataformas em nuvem, onde algoritmos de análise preditiva geram *insights* acionáveis (VISHWAKARMA *et al.*, 2024).

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, compreende-se a importância das tecnologias de monitoramento inteligente, que desempenham papel fundamental na segurança e eficiência das operações de mineração. Quanto aos objetivos estabelecidos, a pesquisa foi executada de acordo com a metodologia definida, com pesquisas realizadas em bases acadêmicas, seleção de estudos de caso e análises de aplicações da IoT na mineração. Esses parâmetros permitiram alcançar o propósito de discutir os desafios e benefícios da aplicação da IoT na mineração em termos de segurança operacional, produtividade e monitoramento em tempo real. Observa-se como as principais limitações relacionadas à implementação é a conectividade em áreas remotas, à robustez dos sensores e à necessidade de ampliação de estudos para a efetiva consolidação da Mineração 4.0.

No contexto regional do estado do Ceará, foi verificado que existe uma carência de produções técnico-científicas que tratem de forma aprofundada a aplicação da IoT na mineração local, tornando-se um obstáculo para identificar casos práticos. Evidenciou-se, assim, a existência de uma lacuna de pesquisa e de implementação tecnológica no setor extrativo cearense, mesmo tendo em vista que o Ceará é de grande relevância econômica no setor de agregados e rochas ornamentais. Os desafios geotécnicos regionais e a ausência de relatos consolidados de uso de IoT indicam a necessidade de promover estudos direcionados, projetos-piloto e políticas que façam incentivo destas implementações, acompanhados de preparo profissional.

A implementação de um projeto com uso de IoT na mineração ainda enfrenta desafios por parte dos gestores, em grande parte residindo na resistência à mudança. Além disso, outro motivo se deve por envolver perdas monetárias iniciais com a implementação dessas novas tecnologias, mesmo com benefícios apresentados existe uma dificuldade em aceitar uma maneira nova de realizar certos processos. Assim, apesar dos desafios, a transição para a realidade da Mineração 4.0 se mostra cada vez mais próxima.

REFERÊNCIAS

ABEDI, M.; AL-JABRI, K.; HAN, B.; FANGUEIRO, R.; LOURENÇO, P. B.; CORREIA, A. G. **Advancing infrastructure resilience: A polymeric composite reinforcement grid with self-sensing and self-heating capabilities.** Construction and Building Materials, v. 435, p. 136730, 2024.

AMARANTE, J. L. **Histórico da mineração. Ministério de Minas e Energia, 2020.** Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/arquivos/aula-2-historico-da-mineracao.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2026.

ASHTON, K. **That ‘Internet of Things’ Thing.** RFID Journal, 2009. Disponível em: <https://www.rfidjournal.com/> . Acesso em: 16 jun. 2025.

BRASIL MINERAL. **Smart Mining. Brasil Mineral, n. 396, 2024.** Disponível em: <https://www.brasilmineral.com.br/revista/396/PDF.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2026.

CHENG, L.; SUN, Y.; WANG, Z.; GAO, W.; LI, Z.; XU, Z.; HU, J. **Distributed Fiber Optic Strain Sensing Technology for Monitoring Soil Deformation Induced by Leakage in Buried Water Pipelines: A Model Test Study.** Sensors, 2025, 25, 320. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s25020320>. Acesso em: 24 jan. 2026.

CISCO. **Goldcorp case study: Internet of Things enables the mine of the future.** San Jose, s.d. Disponível em: https://www.cisco.com/c/dam/en_us/solutions/industries/materials-mining/downloads/c36-goldcorp-cs.pdf. Acesso em: 24 jan. 2026.

CURI, Adilson. **Lavra de minas.** São Paulo: Oficina de Textos, 2017. 432 p.

FUTURECOM DIGITAL. **8 aplicações da Inteligência Artificial na mineração.** 2025. Disponível em: <https://digital.futurecom.com.br/artigos/7-aplicacoes-da-inteligencia-artificial-na-mineracao/>. Acesso em: 24 jan. 2026.

GEOSTATS. **Mineração Inteligente: Transformando Operações com Big Data.** 2025. Disponível em: <https://geostats.com.br/blog/mineracao-inteligente-o-futuro-das-operacoes-com-big-data/>. Acesso em: 24 jan. 2026.

GLOBAL MINING GUIDELINES GROUP. **Guideline for the Implementation of Autonomous Systems in Mining.** 2021. Disponível em: https://gmgroup.org/wp-content/uploads/2024/08/GUIDELINE_Implementation-of-Autonomous-Systems-1.pdf. Acesso em: 24 jan. 2026.

GUBBI, Jayavardhana; BUYYA, Rajkumar; MARUSIC, Slaven; PALANISWAMI, Marimuthu. **Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions.** Future

Generation Computer Systems, v. 29, n. 7, p. 1645–1660, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X13000241?via%3Dihub>. Acesso em: 24 jun. 2025.

HOBBSAWM, E. **A era das revoluções: 1789-1848**. São Paulo: Paz e Terra, 1996.

HOBBSAWM, E. **A era do capital: 1848-1875**. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1977.

HOWDEN. **Howden's Eleonore ventilation on demand solution wins award**. 7 nov. 2019. Disponível em: <https://im-mining.com/2019/11/07/howdens-eleonore-ventilation-on-demand-solution-wins-award/>. Acesso em: 24 jan. 2026.

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Indústria 4.0 na Mineração: Tendências e Casos., 2022**. Disponível em: <https://www.ibram.org.br/publicacoes>. Acesso em: 24 jun. 2025.

IBRAM. **Mineradora adota IoT para promover segurança em operação**. Instituto Brasileiro de Mineração, 2025. Disponível em: <https://ibram.org.br/noticia/mineradora-adota-IoT-para-promover-seguranca-em-operacao/>. Acesso em: 22 jan. 2026.

IBRAM. **Panorama Mineral Brasileiro 2025. Instituto Brasileiro de Mineração, 2025**. Disponível em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2024/09/PMB2024.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2026.

KAGERMANN, H. et al. **Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0**. Journal of Industry Studies, Frankfurt, v. 5, n. 1, p. 10-25, 2020. Disponível em: https://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Publikationen/Industrie_4_0/Final_report_Industrie_4_0_accessible.pdf. Acesso em: 24 jun. 2025.

KOMATSU. **Komatsu and Rio Tinto herald delivery of 300th autonomous haul truck**. 2024. Disponível em: <https://im-mining.com/2024/08/12/komatsu-and-rio-tinto-herald-delivery-of-300th-autonomous-haul-truck/>. Acesso em: 24 jan. 2026.

LEE, I.; LEE, K. **The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises**. Business Horizons, v. 64, n. 4, p. 431–440, jul. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007681320300997>. Acesso em: 16 jul. 2025.

MAINTWORLD. **Building a gold mine of efficiency with IoT**. 5 jun. 2025. Disponível em: <https://www.maintworld.com/News/Building-a-gold-mine-of-efficiency-with-IoT>. Acesso em: 24 jan. 2026.

MOLAEI, F. et al. **A comprehensive review on Internet of Things (IoT) and its implications in the mining industry.** American Journal of Engineering and Applied Sciences, [S. l.], v. 13, n. 3, p. 499-515, 2020. DOI: 10.3844/ajeassp.2020.499.515. Disponível em: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02940030>. Acesso em: 27 jan. 2026.

PEDROSA SANTOS, Rita de Cássia. **Dispositivos móveis para monitoramento de ventilação em mina.** 2021. Disponível em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/04/T-79-Rita-de-Cassia-Pedrosa-Santos.pdf>. Acesso em: 04 jul. 2025.

REVISTA MINÉRIOS. **Sensores IoT na Mineração: o que são, para que servem e os principais benefícios.** Revista Minérios, 2025. Disponível em: <https://revistaminerios.com.br/sensores-IoT-na-mineracao-beneficios/>. Acesso em: 22 jan. 2026.

RIO TINTO. **Rio Tinto autonomous trucks now hauling a quarter of Pilbara material.** Mining.com, 13 maio 2019. Disponível em: <https://www.mining.com/rio-tinto-autonomous-trucks-now-hauling-quarter-pilbara-material/>. Acesso em: 24 jan. 2026.

ROBBIoT / MICROSOFT. **Sensores vestíveis para segurança na mineração: a experiência da Massari Mineração.** Disponível em: <https://robbIoT.com.br/cases/massari-mineracao-IoT-wearables/>. Acesso em: 16 jul. 2025.

STEVAN JUNIOR, Sergio Luiz. Internet das Coisas. [S. l.]: Editora XYZ, 2016. Citado em: CNN Brasil. **Internet das Coisas: o que é, como funciona e exemplos de uso.** 2023. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/tecnologia/internet-das-coisas/>. Acesso em: 18 jan. 2026.

TOFFLER, A. **The third wave.** New York: Bantam Books, 1980.

VISHWAKARMA, Anand et al. **IoT Mining Tracking & Worker Safety Helmet.** International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology (IJRASET), v. 12, n. V, p. 5310–5321, maio 2024. DOI: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2024.62778>. Acesso em: 19 jan. 2026.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Ildany e João, por todos os incentivos de buscar sempre o melhor, minha irmã Alana, minha prima Carolina, que mesmo distante fizeram cada um o seu papel essencial para essa trajetória.

À Universidade Federal do Ceará por todo o ensino de qualidade que me proporcionou viver esta importante etapa em minha vida. A todos os professores que me acompanharam nesta longa e árdua jornada de formação, e também a todos os funcionários da universidade.

A Prof^a. Ma. Thaíla Ravena Santana Carvalho, por toda ajuda e excelente orientação.
Ao Prof. Me. Emanuel Itaquê de Negreiros Moreira pela coorientação.

Aos membros da banca examinadora, Josenildo Isidro dos Santos Filho, Emanuel Itaque de Negreiros Moreira, Vitor Otacílio de Almeida, pela disponibilidade e pelas valiosas colaborações para este trabalho e sugestões.

Aos meus amigos que fiz nesta passagem pela universidade, em especial, Ítalo, Álvaro, Eloisa Maria, Gabrielle, Joana, Raissa, Ana Vitória, Paulo, Francisca Eloisa, Joice, por todos os momentos, experiências, e tornar tudo melhor.