

## MANUTENÇÃO DE TECNOLOGIAS ANALÓGICAS APLICADAS A MINERAÇÃO EM CONTEXTOS GEOPOLÍTICOS INSTÁVEIS

RODRIGO DOS SANTOS CAIRES<sup>1</sup>, CAMILA REIS DE SOUZA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Estudante em Engenharia de Minas, IFBA, Brumado-BA, rodrigosc.aires@outlook.com

<sup>2</sup>Engenheira de Minas, M<sup>a</sup>. em Ciências Ambientais, Prof. EBTT, IFBA, Brumado-BA, camila.souza@ifba.edu.br

Apresentado no  
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC  
6 a 9 de outubro de 2025

**RESUMO:** A digitalização acelerada da mineração expõe o setor a ciberameaças e falhas eletrônicas, ao mesmo tempo em que eleva sua importância geopolítica devido à centralidade dos recursos minerais em negociações internacionais. O estudo é uma revisão bibliográfica e documental qualitativa, com foco na resiliência operacional frente a vulnerabilidades digitais. A análise recaiu sobre três eixos: tecnologias analógicas, riscos da digitalização e implicações geopolíticas da mineração brasileira. Métodos analógicos aumentam a robustez operacional ao evitar paralisações causadas por ciberataques. O Brasil, com grandes reservas de nióbio e lítio, possui insumos para tecnologias autônomas e analógicas. Sua infraestrutura logística diversificada, aliada a rotas comerciais alternativas, assegura resiliência em crises digitais. A adoção de soluções analógicas como complemento a sistemas digitais constitui uma estratégia racional de continuidade operacional no setor mineral.

**PALAVRAS-CHAVE:** Resiliência operacional; tecnologias analógicas; geopolítica mineral

## MAINTENANCE OF ANALOG TECHNOLOGIES APPLIED TO MINING IN UNSTABLE GEOPOLITICAL CONTEXTS

**ABSTRACT:** The accelerated digitalization of mining exposes the sector to cyber threats and electronic failures, while simultaneously increasing its geopolitical importance due to the centrality of mineral resources in international negotiations. This study is a qualitative bibliographic and documentary review focusing on operational resilience in the face of digital vulnerabilities. The analysis focused on three axes: analog technologies, digitalization risks, and geopolitical implications of Brazilian mining. Analog methods enhance operational robustness by preventing shutdowns caused by cyberattacks. Brazil, with large reserves of niobium and lithium, has inputs for autonomous and analog technologies. Its diversified logistical infrastructure, combined with alternative trade routes, ensures resilience in digital crises. The adoption of analog solutions as a complement to digital systems constitutes a rational strategy for operational continuity in the mining sector.

**KEYWORDS:** Operational resilience; analog technologies; mineral geopolitics

### INTRODUÇÃO

O setor mineral tem vivenciado rápida digitalização, com adoção crescente de sistemas automatizados, sensores conectados e redes inteligentes, o que eleva a eficiência operacional, porém aumenta a vulnerabilidade a falhas digitais e ciberataques (Bartnitzki, 2017; Olsson & Franke, 2019; Serror et al., 2020; Bonfim, 2025). Em contextos de conflito, tecnologias digitais críticas podem ser comprometidas, tornando indispensável a preservação de métodos analógicos, como mapas em papel, para garantir autonomia decisória e continuidade operacional (Sapkota & Madria, 2024).

Na mineração, a integração entre a *Internet* das Coisas e veículos autônomos expõe as operações a riscos capazes de paralisar equipamentos e cadeias produtivas automatizadas (Almashhdani et al., 2023;

Conti et al., 2021). Simultaneamente, os recursos minerais estratégicos, especialmente terras raras, lítio e titânio, ganham importância geopolítica na transição energética global, sendo objeto de disputas e acordos internacionais que visam assegurar acesso e reduzir dependências entre potências econômicas (Lee, Ahuja & Čavoški, 2024; Schmidt et al., 2023; Kalantzakos, 2018; Wübbelkind et al., 2022).

Este estudo aborda a manutenção de tecnologias analógicas na mineração como medida de resiliência frente a falhas digitais e instabilidades geopolíticas, além de examinar o uso estratégico dos dados minerais em cenários de conflito.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa caracteriza-se como uma revisão bibliográfica e documental voltada à análise de estratégias de resiliência operacional frente a vulnerabilidades digitais em setores críticos, com ênfase no setor mineral. Foram utilizadas fontes secundárias publicadas no período de 2015 a 2025 em artigos científicos, relatórios técnicos e documentos institucionais.

A seleção do material foi orientada por três eixos temáticos principais: (i) o papel de tecnologias analógicas em contextos de negação eletrônica; (ii) os riscos associados à digitalização de sistemas ciberfísicos; e (iii) as implicações logísticas e geopolíticas da exploração mineral brasileira, especialmente quanto ao uso de recursos estratégicos. Entre os documentos analisados, destacam-se o Informe Mineral da Agência Nacional de Mineração – ANM, relatórios sobre transporte mineral da Agência Nacional de Transportes Aquaviários – ANTAQ e, artigos acadêmicos sobre cibersegurança, mineração digitalizada e conflitos geopolíticos envolvendo recursos minerais. Fontes jornalísticas foram utilizadas pontualmente, apenas quando embasadas em dados técnicos ou entrevistas com especialistas.

As informações sobre comércio mineral, escoamento e estrutura logística foram extraídas de relatórios oficiais e utilizadas para fundamentar a análise sobre a resiliência do setor frente a falhas digitais, interrupções operacionais ou ataques cibernéticos. Esses dados subsidiaram as discussões sobre a importância dos sistemas analógicos na manutenção da continuidade operacional.

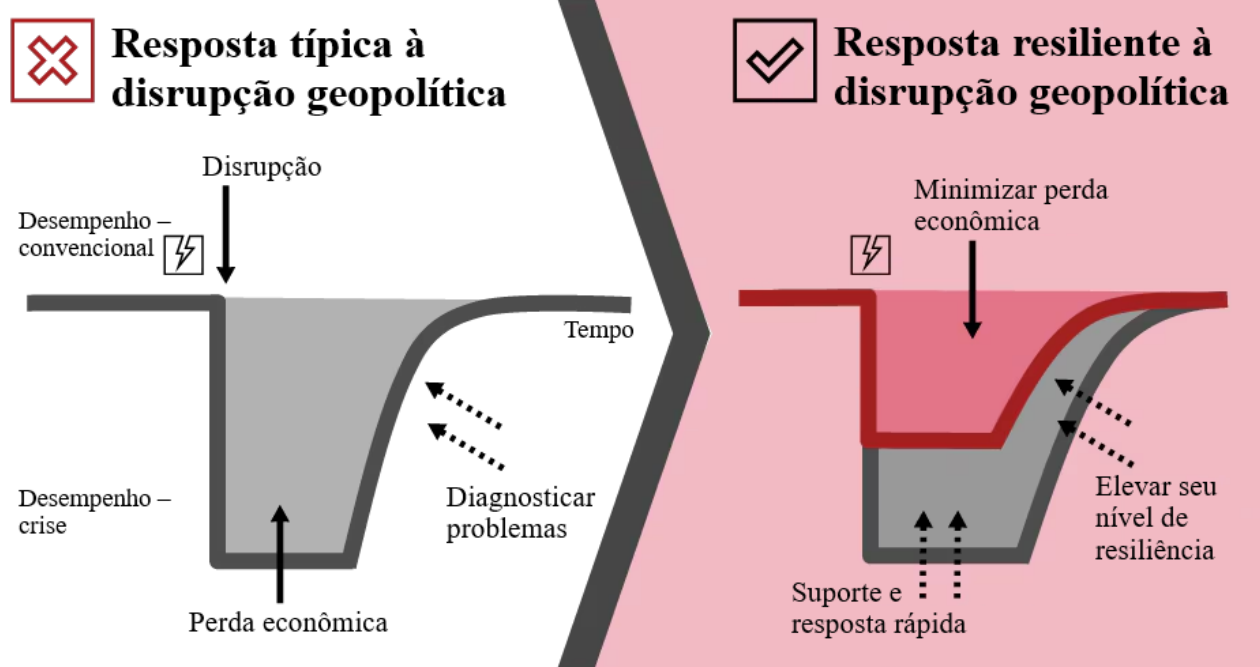
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em contextos de vulnerabilidade digital, instrumentos analógicos ampliam a resiliência operacional frente a falhas e ataques cibernéticos (Rumberg, 2017). Conflitos recentes, marcados por interferências eletrônicas e ofensivas cibernéticas, têm motivado a reintrodução de métodos analógicos para navegação e comando (Bay, Batrla & Twetman, 2020). A literatura sobre guerra digital destaca a relevância desses recursos em cenários de negação eletrônica, nos quais garantem comunicação e orientação (Rumberg, 2017).

No setor mineral, dispositivos não digitalizados, como sistemas hidráulicos e medidores manuais, operam independentemente de redes eletrônicas, conferindo imunidade a ciberataques e garantindo continuidade operacional em crises (Chatterjee et al., 2025). Essa abordagem está alinhada ao conceito de *resilient response*, discutido por Strategy&, Figura 1, que privilegia estratégias preventivas para mitigar perdas e acelerar a recuperação.

A vulnerabilidade de infraestruturas baseadas em sistemas que monitoram e controlam processos remotos, inclusive os integrados que ativam comunicação analógica em falhas digitais, é amplamente reconhecida, e a manutenção de meios operacionais não digitais paralelos constitui uma camada adicional de segurança e resiliência (Barkat Ullah et al., 2025). Em estudos sobre sistemas ciberfísicos, destaca-se que a inserção de mecanismos de *backup*, físicos e digitais, eleva a robustez estrutural e reduz o risco de interrupções prolongadas (Ganin et al., 2015). Em ambientes operacionais críticos, a combinação de estratégias é notada como uma boa prática para assegurar a continuidade funcional, mesmo diante de ataques cibernéticos ou instabilidades sistêmicas (Khairullah & Elks, 2019).

Figura 1. Comparação entre resposta típica e resposta resiliente a disrupções geopolíticas



Fonte. Adaptado de Strategy&

A crescente digitalização na mineração, impulsionada por sistemas ciberfísicos (CPS), amplia a superfície de ataque, expondo as operações a riscos como negação de serviço e manipulação de dados (Tubis et al., 2020; Gaber et al., 2021). Casos recentes incluem sequestro de dados, roubo de credenciais e invasões via fornecedores (Almashhdani et al., 2023; Conti et al., 2021), além de espionagem industrial, com exfiltração de informações estratégicas, como volumetria de jazidas e projeções de produção (Wangen, 2015).

A dimensão geopolítica dos dados minerais é evidenciada na instrumentalização dos recursos estratégicos por países em disputas internacionais (Jungmann, 2025). O Brasil, com 98,53% das reservas de nióbio (Alves & Coutinho, 2015), ocupa posição privilegiada, embora apenas 27% do território nacional tenha mapeamento geológico detalhado (Travassos da Rosa-Costa et al., 2024). Recursos como nióbio e lítio viabilizam a produção de equipamentos analógicos, como rádios VHF/UHF e sistemas FSK, autônomos e imunes a ataques digitais (Scalambrin et al., 2023).

Tabela 1. Desempenho da balança do setor mineral, do 1º trimestre de 2022 e de 2023 (USD Bilhões)

Período	Corrente de comércio	Exportação	Importação	Saldo
1º trimestre de 2022	27,95	16,49	11,46	5,04
1º trimestre de 2023	26,58	15,87	10,71	5,17

Fonte. ANM (2023)

A diversificação das rotas e mercados do comércio mineral contribui diretamente para a resiliência do setor: as redes de exportação de minério de ferro brasileiras figuram entre as menos concentradas do

mundo, com destino não apenas à China, mas também a países como Japão, Malásia e Alemanha. A análise topológica da rede evidenciou que, mesmo diante de choques localizados, como bloqueios portuários ou sanções comerciais, o país mantém caminhos alternativos para o escoamento mineral (Zhao et al., 2023). Em 2023, mesmo com queda nos preços do minério de ferro, o setor registrou superávit comercial de US\$5,17 bilhões, próximo ao valor de 2022 (ANM, 2023), Tabela 1, evidenciando a capacidade adaptativa frente a tensões conjunturais.

Em crises operacionais, a continuidade do fluxo físico depende da ativação de protocolos alternativos, como listas manuais (IPEA, 2022). A infraestrutura multimodal, com destaque para a cabotagem no escoamento de bauxita e manganês, reforça essa adaptabilidade. Em situações de falhas digitais, rotas fluviais e marítimas, assistidas por sistemas analógicos, asseguram o transporte e evitam rupturas no fornecimento de insumos a tecnologias robustas de baixa complexidade, como sinalização e monitoramento de encostas (ANTAQ, 2023).

## CONCLUSÃO

Este trabalho evidenciou que, em cenários de crescente vulnerabilidade digital, a presença de tecnologias analógicas contribui para a resiliência operacional, especialmente em setores estratégicos como a mineração. Métodos analógicos, embora menos sofisticados, demonstram utilidade prática frente a falhas sistêmicas, ataques cibernéticos e interrupções em redes digitais.

O caso brasileiro reforça essa lógica: com reservas minerais estratégicas e estrutura logística relativamente diversificada, o país possui condições de manter operações mesmo sob eventos disruptivos. A integração de soluções analógicas em sistemas ciber-físicos, portanto, não deve ser vista como obsolescência, mas como estratégia racional de continuidade operacional em ambientes de risco.

## REFERÊNCIAS

- Almashhdani, A.O. et al. Securing the industrial internet of things against ransomware attacks: Challenges and future directions. **Future Generation Computer Systems**, v. 150, p. 110–121, 2023
- Alves, A. R.; Coutinho, A. dos R. The evolution of the niobium production in Brazil. **Materials Research**, v. 18, p. 106-112, 2015
- ANM. Agência Nacional de Mineração. Informe mineral: primeiro trimestre de 2023. Brasília: MME/ANM, 2023
- ANTAQ. Agência Nacional De Transportes Aquaviários. Estatísticas de Transporte Marítimo e de Cabotagem 2023. Brasília: Antaq, 2023
- Barkat Ullah, A. et al. A comprehensive review of cyber security and current practices in global mining critical infrastructure. **Journal of Cyber Security Technology**, p. 1-27, 2025.
- Bartnitzki, T. Mining 4.0: importance of industry 4.0 for the raw materials sector. Mining Report; jan2017, Vol. 153 Issue 1, p25-31, 7p
- Bay, S.; Batra, M.; Twetman, H. **Camouflage for the digital domain: a force protection framework for armed forces**. Letônia: NATO Strategic Communications Centre of Excellence, 2020
- Bonfim, R. Digitalização das redes elétricas aumenta risco de ataques cibernéticos, alerta estudo. **Correio Braziliense**. 2025. Disponível em: <https://www.correiobraziliense.com.br/tecnologia/2025/04/7090396-digitalizacao-das-redes-eletricas-aumenta-risco-de-ataques-ciberneticos-alerta-estudo.html>. Acesso em: 01 jul. 2025
- Chatterjee, C. et al. Digitization of the mining industry: pathways to sustainability through enabling technologies. **Resources Policy**, v. 100, p. 105450, 2025.
- Conti, M. et al. Cyber threats to industrial iot: a survey on attacks and countermeasures. **Journal of Cybersecurity and Privacy**, Basel, v. 2, n. 1, p. 163–196, 2021

- Gaber, T. et al. Autonomous haulage systems in the mining industry: cybersecurity, communication and safety issues and challenges. **Electronics**, v. 10, n. 11, p. 1357, 2021
- Ganin, A. et al. Operational resilience: concepts, design and analysis. **arXiv**, 5 ago. 2015
- IPEA. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Minerais estratégicos e críticos: uma visão internacional e da política mineral brasileira. Brasília: Ipea, 2022 (Texto para Discussão, n. 2768)
- Jungmann, Raul. Minérios: a nova moeda geopolítica e imperativo estratégico para o Brasil. **Correio Braziliense**, Brasília, 09 mar. 2025
- Kalantzakos, S. China and the geopolitics of rare earths. **The European Financial Review**, 2018
- Khairullah, S.; Elks, C. Self-repairing hardware architecture for safety-critical cyber-physical-systems. **arXiv**, 30 out. 2019
- Lee, R.; Ahuja, J.; Čavoški, A. The geopolitics of access to critical minerals necessary to support energy transition. **Global Energy Law and Sustainability**, Edinburgh, v. 5, n. 1, p. 61–81, 2024
- Olsson, T.; Franke, U. Risks and assets: a qualitative study of a software ecosystem in the mining industry. *In: ACM Joint European Software Engineering Conference and Symposium on the Foundations of Software Engineering*, 27., 2019, Tallinn. *Anais [...]*. New York: ACM, 2019. p. 1–10. DOI 10.1145/3338906.3340443
- Rumberg, B. Analog processing: reducing the battery cost of battlefield situational awareness. **HDIAC Journal**, v. 3, n. 4, dez. 2017
- Sapkota, G.; Madria, S. Secure navigation using landmark-based localization in a GPS-denied environment. **arXiv preprint arXiv:2402.14280**, 2024.
- Scalambri, L.; Zanella, A.; Vilajosana, X. LoRa multi-hop networks for monitoring underground mining environments. **arXiv**, out. 2023
- Schmidt, T. S. et al. A critical minerals perspective on the emergence of geopolitical trade blocs. **Energy Economics**, v. 122, 2023
- Serror, M. et al. Challenges and opportunities in securing the industrial internet of things. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 17, n. 5, p. 2985-2996, 2020
- Strategy&. Resilience reloaded: how companies can emerge stronger from disruptions. **PwC**. Disponível em: <https://www.strategyand.pwc.com/de/en/functions/operations/resilience-reloaded.html>. Acesso em: 21 jul. 2025.
- Wübbekind, F. et al. Geopolitics and rare earth elements: an analysis of global dependencies and strategic implications. **Resources Policy**, v. 78, p. 102774, 2022
- Travassos da Rosa-Costa, L. et al. **Plano decenal de mapeamento geológico básico: PlanGeo 2025-2034**. Brasília: Serviço Geológico do Brasil, 2024.
- Tubis, A. A. et al. Cyber-attacks risk analysis method for different levels of automation of mining processes in mines based on fuzzy theory use. **Sensors**, v. 20, n. 24, p. 7210, 2020
- Wangen, G. The role of malware in reported cyber espionage: a review of the impact and mechanism. *information*, v. 6, n. 2, p. 183–211, 2015. DOI:10.3390/info6020183
- Zhao, J.; Chen, X.; Wang, Y. Supply risk propagation in the global iron ore trade network. **Frontiers in Earth Science**, v. 11, p. 1–12, 2023. DOI: 10.3389/feart.2023.1126145