

ESCOLA SESI ALVIMAR CARNEIRO DE REZENDE, CONTAGEM - MG

**MINERAECOSMART: INTEGRANDO ALGAS, PLANTAS
AQUÁTICAS E EDUCAÇÃO STEM PARA AVANÇOS
SOCIOAMBIENTAIS NA MINERAÇÃO DE BRUMADINHO-
MG**

Contagem, MG

2025



Laura Napoli Caldeira Silva
Escola SESI Alvimar Carneiro de Rezende
laura.napolicaldeira@gmail.com

Melissa Ferreira Santos
Escola SESI Alvimar Carneiro de Rezende
melissaferreirasantos664@gmail.com

Rafael Coelho de Freitas
Escola SESI Alvimar Carneiro de Rezende
rafael.rcfreitas@gmail.com

Wellington Nora Soares
Escola SESI Alvimar Carneiro de Rezende
wnsoares@gmail.com

Gracielle Pereira Pimenta Bragança
Escola SESI Alvimar Carneiro de Rezende
gracielle.braganca@gmail.com

MINERAECOSMART: INTEGRANDO ALGAS, PLANTAS AQUÁTICAS E EDUCAÇÃO STEM PARA AVANÇOS SOCIOAMBIENTAIS NA MINERAÇÃO DE BRUMADINHO- MG

Relatório apresentado à 9ª FEMIC - Feira
Mineira de Iniciação Científica.

Orientação do Prof. Wellington Nora Soares e
coorientação de Gracielle Pereira Pimenta
Bragança

Contagem, MG

2025



RESUMO

A mineração é considerada fundamental para o desenvolvimento econômico e tecnológico, fornecendo minerais para diversos setores industriais. No entanto, seus processos geram resíduos, como metais pesados, CO₂ e lama, exigindo manejo adequado para proteger o meio ambiente. Este trabalho aplicou um sistema automatizado, com Arduino e Inteligência Artificial (IA), para monitorar e controlar parâmetros como pH, temperatura, CO₂, O₂ e luminosidade. O objetivo foi otimizar o cultivo de plantas e microalgas que absorvem resíduos da mineração, promovendo a remediação das águas contaminadas. As espécies *Pistia stratiotes* e *Chlorella vulgaris* foram escolhidas por sua capacidade de remover metais pesados, CO₂ e outras impurezas. A lama residual foi reaproveitada na produção de tijolos ecológicos, combinada com biomassa vegetal e algal, explorando propriedades naturais de aglutinação e soluções construtivas acessíveis, baseadas em tecnologia social. O sistema incluiu minigeradores hidráulicos que otimizaram o uso energético, auxiliaram na oxigenação e favoreceram o desenvolvimento das bioespécies. A IA ajustou continuamente as condições ambientais e identificou o momento ideal para colheita, maximizando a captura de CO₂ e minerais. A qualidade da água, livre de resíduos, foi garantida também por meio da desinfecção por luz ultravioleta, prevenindo eutrofização causada por algas remanescentes no retorno ao ambiente. O desempenho do sistema foi avaliado por análises físico-químicas comparativas entre arranjos com e sem automação. Os resultados comprovaram que as algas e plantas absorveram metais em taxas superiores a 80% em dez dias. Os dados serão apresentados à comunidade do assentamento Pastorinhas, visando o uso de tecnologias sociais e o desenvolvimento sustentável local. Parcerias com UFMG e UEMG apoiaram a validação técnica, enquanto a Defesa Civil e o Corpo de Bombeiros avaliaram e aprovaram a sua aplicação em planos de prevenção de riscos.

Palavras-chave: Biorremediação. Bissorção. Bioacumulação. Automação. Inteligência artificial.



SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	5
2 JUSTIFICATIVA	7
3 OBJETIVO GERAL	8
4 METODOLOGIA	9
5 RESULTADOS OBTIDOS	22
6 CONCLUSÕES OU CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	32
REFERÊNCIAS.....	33

1 INTRODUÇÃO

A mineração desempenha um papel fundamental no desenvolvimento econômico e social, já que fornece matérias-primas essenciais para a indústria e para a produção de bens amplamente utilizados no nosso dia a dia. No campo, por exemplo, os minérios são indispensáveis na produção de fertilizantes que ajudam a melhorar a fertilidade do solo e aumentar a produtividade, fortalecendo o agronegócio, um dos pilares da economia brasileira. Os metais extraídos também são parte importante de setores como a construção civil, indústria automobilística, eletrônicos e geração de energia.

Segundo dados da Agência Nacional de Mineração, o Brasil está entre os principais produtores mundiais de ferro, bauxita, cobre e outros minérios. Em 2023, o setor movimentou mais de R\$ 250 bilhões, com forte impacto positivo no PIB e nas exportações nacionais.

Por envolver processos complexos, a mineração naturalmente gera resíduos e subprodutos, como a liberação de dióxido de carbono e o uso de água que pode conter metais. Durante etapas como a lixiviação, por exemplo, há emissão de CO_2 , e nas fases de extração, a água pode apresentar metais como cromo, chumbo, cádmio, ferro e cobre, resultado de reações entre os compostos minerais e os reagentes utilizados.

Estudos como o de Silva et al. (2020) destacam a importância de monitorar a qualidade da água nas regiões mineradoras, tanto para preservar os ambientes aquáticos quanto para garantir o uso responsável desse recurso pelas populações locais. Já Ribeiro e Martins (2019) apontam que o bom planejamento na destinação de resíduos sólidos, como a lama gerada no desaguamento, contribui diretamente para a sustentabilidade e o equilíbrio ambiental.

Diante desse cenário, este projeto propõe a criação de um sistema integrado voltado ao aproveitamento de subprodutos da mineração, como o CO_2 , a água com metais e a lama resultante do desaguamento. A proposta é utilizar algas e plantas aquáticas com capacidade

de fotossintetizar o CO_2 e absorver os metais presentes na água. Para melhorar ainda mais o processo, será implementado um sistema de filtragem, que ajudará a tornar a água mais limpa durante o cultivo.

Um dos pontos fortes da iniciativa é o reaproveitamento da biomassa gerada, combinada com a lama, na produção de tijolos ecológicos. As substâncias naturais produzidas pelas algas e plantas contribuem para a resistência do material final, criando uma solução de baixo custo e fácil replicação. Por isso, o projeto também se encaixa como uma tecnologia social, com potencial para beneficiar diretamente comunidades ligadas à mineração.

O sistema ainda contará com minigeradores hidráulicos, aproveitando o fluxo da água para recuperar parte da energia utilizada e oxigenar o ambiente, favorecendo o crescimento das espécies cultivadas. Além disso, com o apoio da inteligência artificial, será possível monitorar todo o processo e identificar os melhores momentos para a colheita, maximizando a absorção de CO_2 e metais, e aumentando a eficiência geral do sistema.

Após os experimentos, os resultados serão levados à comunidade do assentamento Pastorinhas (Brumadinho – MG), promovendo o uso de tecnologias sociais e contribuindo para o desenvolvimento sustentável local. Estão previstas parcerias com a UFMG e a UEMG para validação técnica do projeto, enquanto a Defesa Civil e o Corpo de Bombeiros farão a avaliação de sua aplicação em planos de prevenção de riscos.

Vale destacar ainda o caráter educacional do projeto. A participação de estudantes na construção e no acompanhamento do sistema proporciona uma vivência prática dos conhecimentos científicos e tecnológicos, dentro de uma abordagem baseada na educação STEM (Ciência, Tecnologia, Engenharia e Matemática). Essa metodologia contribui para tornar a aprendizagem mais significativa, integrando teoria e prática de forma contextualizada, e despertando o interesse dos alunos por soluções sustentáveis, inovação e pesquisa aplicada.

Assim, a proposta se apresenta como uma alternativa inovadora, sustentável e acessível. Ela valoriza os subprodutos da mineração, estimula o uso consciente dos recursos naturais e reforça a importância de integrar tecnologia, responsabilidade social, educação e preservação ambiental no caminho do desenvolvimento.

2 JUSTIFICATIVA

A crescente demanda por recursos minerais, aliada aos impactos ambientais decorrentes da mineração tradicional, exige o desenvolvimento de soluções inovadoras que conciliem produtividade, preservação ambiental e responsabilidade social. O projeto **MineraEcoSmart** surge como uma proposta alinhada a esses desafios, ao integrar tecnologias como sensores baseados em Arduino, Internet das Coisas (IoT), energia renovável e sistemas automatizados de monitoramento para otimizar processos e reduzir danos ambientais.

Além do controle preciso de parâmetros essenciais, como qualidade da água, temperatura, umidade e pH, a iniciativa incorpora o conceito de **tecnologia social**, permitindo sua aplicação em comunidades e instituições de ensino. Essa abordagem fomenta a educação científica e tecnológica (STEM), capacitando estudantes e populações locais para compreender e utilizar sistemas inteligentes no manejo sustentável de recursos.

A relevância científica do MineraEcoSmart está na capacidade de unir práticas de mineração e gestão ambiental com inovação tecnológica de baixo custo e fácil replicabilidade. Ao oferecer dados em tempo real e favorecer a tomada de decisões baseada em evidências, o projeto contribui para a preservação dos ecossistemas, o uso racional da água, a redução de energia e a formação de uma cultura de sustentabilidade, fortalecendo o papel da ciência como agente transformador na sociedade.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Avaliar um sistema automatizado com Arduino e IA para monitorar plantas e algas biofiltradoras na remoção de CO₂ e metais pesados de águas residuais da atividade mineradora. A biomassa será incorporada à lama residual para produzir tijolos ecológicos.

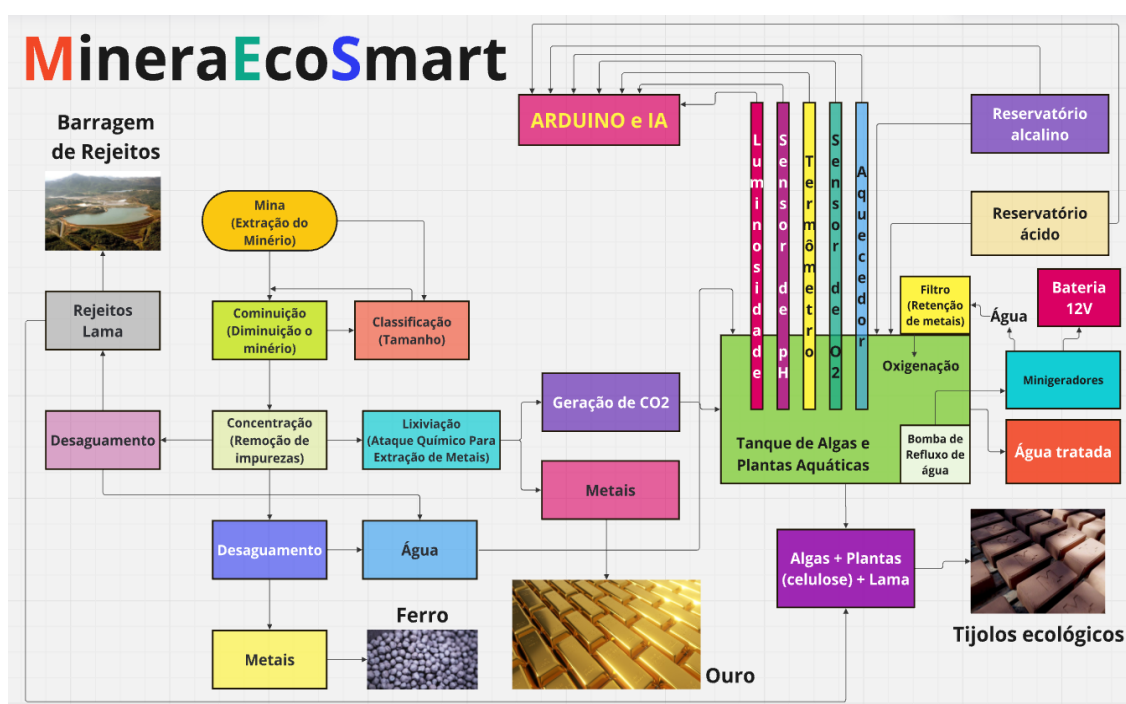
3.2 Objetivos específicos

- 1 - Cultivar **Pistia stratiotes** e **Chlorella vulgaris** para remover CO₂ e metais pesados de águas residuais.
- 2 - Reaproveitar a lama residual da mineração com a biomassa gerada para fabricar tijolos ecológicos com tecnologia social.
- 3 - Firmar parcerias com UFMG e UEMG para validação técnico-científica do sistema.
- 4 - Adicionar módulo complementar de filtragem ao sistema para maior eficiência.
- 5 - Instalar minigeradores hidráulicos que melhorem a oxigenação, o uso energético e o crescimento das espécies.
- 6 - Usar IA para monitorar variáveis ambientais e definir o melhor momento de colheita.
- 7 - Avaliar a qualidade da água e redução de metais com análises físico-químicas.
- 8 - Implementar desinfecção por luz UV após o tratamento biológico.
- 9 - Avaliar a Inclusão do sistema em planos de prevenção com apoio da Defesa Civil e Bombeiros.
- 10 - Divulgar os resultados à comunidade Pastorinhas, incentivando práticas sustentáveis.

4 METODOLOGIA

A metodologia proposta neste estudo, o MineraEcoSmart (figura 1) buscou implementar um sistema inovador de cultivo de algas e plantas aquáticas, integrando tecnologias para monitoramento e controle automatizado dos parâmetros. Utilizando o Arduino como base para a gestão dos parâmetros de pH, temperatura e oxigênio dissolvido, o sistema incorpora bombas de refluxo, minigeradores hidráulicos e filtros para promover a sustentabilidade e a eficiência do processo.

Figura 01 – Projeto MineraEcoSmart



Fonte: Autoria própria (2025)

Assim, a seguir, detalha-se a implementação de cada etapa do projeto

Injeção de CO₂: Para desenvolver um sistema de cultivo de algas e plantas aquáticas capaz de absorver CO₂ e metais pesados presentes nas águas contaminadas pela mineração, foi integrado ao tanque de cultivo, um ducto, representando o processo de lixiviação, uma injeção de CO₂ proveniente de um cilindro pressurizado da Water Plant (figura 2).



Figura 02 – Cilindro pressurizado com CO₂



Fonte: <https://www.cobasi.com.br>

Para monitorar a concentração de dióxido de carbono (CO₂) dissolvido na água, foi utilizado um dispositivo do tipo *drop checker* da *Indus Pharma* (figura 3), contendo uma solução indicadora específica. Esse indicador apresenta variações de cor conforme a concentração de CO₂: coloração azul indica níveis baixos, verde corresponde à concentração ideal, e amarelo sinaliza excesso de CO₂ no meio aquático.

Figura 03 – Drop checker



Fonte: <https://www.cobasi.com.br>

Programação do Arduino UNO:

O sistema eletrônico foi programado utilizando a linguagem C++ por meio do ambiente gratuito disponibilizado pela própria plataforma Arduino. O script desenvolvido teve como finalidade acompanhar os níveis de pH, a concentração de oxigênio dissolvido e a temperatura da água. Após a finalização do código, ele foi carregado na placa Arduino, à qual foram integrados os sensores responsáveis pelas medições mencionadas, além de um sensor de luminosidade, válvulas controladas eletronicamente e um dispositivo de aquecimento, permitindo a automação do funcionamento do experimento.

Iluminação:

Para investigar os efeitos da luminosidade no desenvolvimento de culturas aquáticas, foram utilizados dois sistemas experimentais: um com controle automatizado de iluminação artificial e outro dependente exclusivamente da luz solar natural. No sistema com controle automatizado de luminosidade, a luminária da AAtop 12V foi instalada a 15 cm acima da superfície dos tanques e também nas laterais externas, utilizando-se uma fita de LED. As luminárias foram conectadas a um microcontrolador Arduino Uno para assegurar a precisão no controle do fotoperíodo. A programação, desenvolvida em linguagem C++ na plataforma Arduino IDE, foi configurada para simular um ciclo diário de 12 horas de luz, com o acionamento automático da iluminação às 6h e o desligamento às 18h.

Sensores de pH e válvulas solenoides (figura 4): No caso do pH, recipientes externos contendo ácido cítrico a 2 g/L e bicarbonato de sódio a 2 g/L, conectados às válvulas solenoides da YUNHI 110V, controladas pelo Arduino, foram programadas para se abrir sempre que sensor de pH do Arduino registrar uma variação fora da faixa ideal para o desenvolvimento de algas e plantas, que será entre 6,5 e 7,5, corrigindo o pH e mantendo-o dentro dos níveis ideais para o desenvolvimento das espécies.



Figura 04 – Eletrodo de pH e válvula solenóide



Fonte: <https://www.cobasi.com.br>

Sensores oxigênio dissolvido, minigeradores, filtro biológico, controlador de carga e bateria de 12V (figura 5): Para manter o oxigênio dissolvido dentro da faixa ideal (entre 5 e 10 mg/L), foi introduzida no tanque de algas e plantas uma bomba de refluxo de água da EGEIA modelo XYZ100, 100W. Esta bomba foi conectada a minigeradores hidráulicos da MAT DC 12V, de forma que, ao passar pela bomba, a água movimentasse as pás e gerasse energia. A tensão gerada varia entre 12 e 24V, e os fios do minigerador foram conectados a um controlador de carga da **ERwSolar** 10A 12V, permitindo o controle da tensão de entrada em uma bateria da UNIPOWER 12V. A essa bateria, foi conectada uma lâmpada de 12V, para demonstrar a utilização de parte da energia recuperada no processo. A água, ao sair do minigerador, foi direcionada a um filtro da GENECA GD 16 contendo mídias (carvão ativo e espumas de poliuretano) com a capacidade de absorver metais pesados, retornando ao aquário e oxigenando a água. O oxigênio dissolvido foi monitorado pelo sensor de oxigênio dissolvido do Arduino.



Figura 05 – Sensores oxigênio dissolvido, minigeradores, controlador de carga, bateria de 12V filtro biológico e bomba de refluxo.



Fonte: <https://www.cobasi.com.br>

Aquecedor e sensor de temperatura: Foi introduzido no tanque um aquecedor termostático de marca Aqua Tank (ver Figura 6), cuja operação é controlada por uma placa controladora Arduino. O aquecimento foi programado para manter os níveis de temperatura da água adequado à fisiologia e a reprodução das algas e plantas, isto é, 20 ° C e 30° C. Quando a temperatura da água cai abaixo dos 20° C; o aquecedor é ativado; passando 30°



C; o aquecedor é desativado. O monitoramento é feito de forma contínua, através do sensor de temperatura submerso, que está diretamente conectado ao sistema eletrônico.

Figura 6 – Termostato e sensor de temperatura do arduino



Fonte: <https://www.cobasi.com.br>

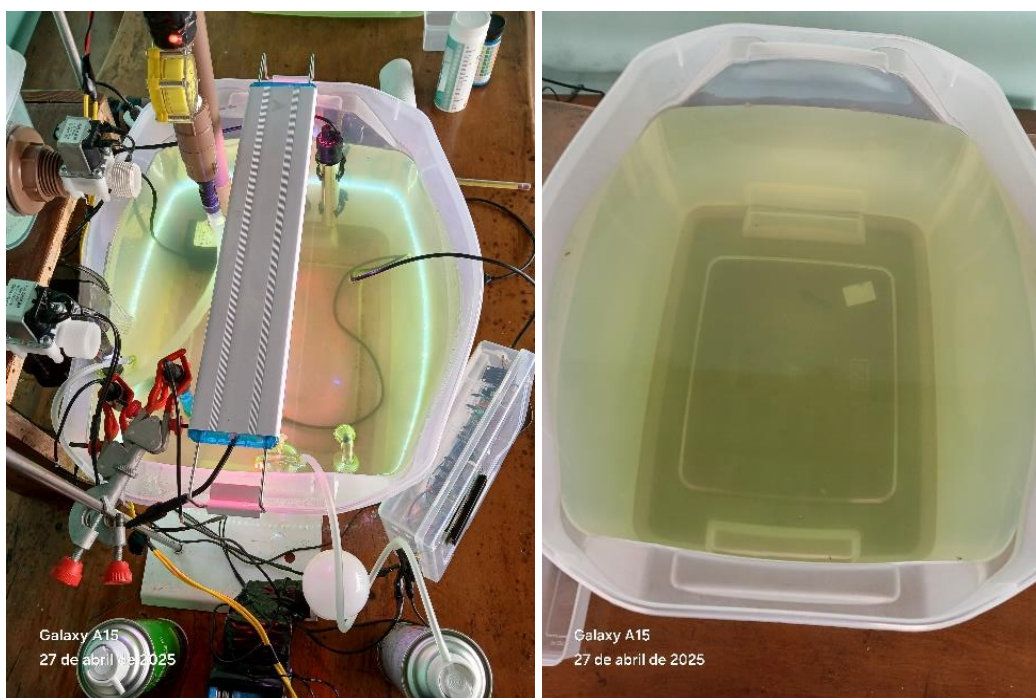
Tanques experimentais

Para a realização dos experimentos, foram preparados 60 litros de uma solução multimetálica contendo os íons Cr^{6+} , Cu^{2+} e Fe^{2+} , cada um na concentração de 1 mg/L. Após homogeneização, essa solução foi dividida equitativamente em dois tanques (figura 7) com volume de 30 litros cada. Nos tanques com *Chlorella vulgaris*, foram introduzidas microalgas em uma concentração total de 1.350.588 células por mL. Já os tanques com *Pistia stratiote* (Figura 8), continham, cada um, 250 g de massa fresca (plantas vivas). A avaliação da capacidade de absorção de metais foi realizada separadamente para *Chlorella vulgaris* e *Pistia stratiotes*, utilizando-se, para cada espécie, dois sistemas distintos: um com monitoramento e controle automatizado dos parâmetros ambientais (como pH, temperatura, CO_2 , oxigênio dissolvido e luminosidade) e outro sem qualquer tipo de controle. Em todos os tanques foram adicionadas soluções nutritivas previamente preparadas (Figura 9), formuladas com o objetivo de fornecer os nutrientes essenciais ao desenvolvimento das espécies e permitir a comparação entre os sistemas sob diferentes



condições ambientais. As soluções utilizadas incluíram Nitrato de Cálcio ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) a 40 g/L, Metassilicato de Sódio (Na_2SiO_3) a 25 g/L, Cloreto de Ferro III (FeCl_3) a 0,8 g/L, Sulfato de Magnésio ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) a 25 g/L, Carbonato de Sódio (Na_2CO_3) a 20 g/L e Fosfato de Potássio Bibásico (K_2HPO_4) a 10 g/L. Foi adicionado 1 mL de cada solução nutritiva para cada litro de água do tanque, totalizando 30 mL de cada solução por tanque.

Figura 7 – Tanque automatizado (esquerda) e tanque não automatizado (direita) contendo a *Clorella vulgaris*



Fonte: Autoria própria (2025)



Figura 8 – Tanque automatizado (esquerda) e tanque não automatizado (direita) contendo a *Pistia stratiotes*



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 9 – Soluções nutritivas e tanque com a *Pistia stratiotes*



Fonte: Autoria própria (2025)

Avaliação da eficácia do sistema integrado na melhoria da qualidade da água e na redução da contaminação por metais pesados: Com o objetivo de avaliar a eficácia do sistema integrado na melhoria da qualidade da água e na redução da concentração de metais pesados, foram realizadas análises de amostras de água coletadas ao longo de 10 dias, em dois sistemas experimentais distintos: um automatizado e outro não automatizado. As



amostras foram submetidas à quantificação dos íons cromo hexavalente (Cr^{6+}), ferro ferroso (Fe^{2+}), cobre (Cu^{2+}) e ferro total (Fe), por meio da técnica de espectrofotometria na região do ultravioleta-visível (UV-Vis). Foram utilizados métodos espectrofotométricos específicos para a obtenção das curvas de calibração de metais em solução. Para o **ferro (Fe^{2+})**, aplicou-se o método da **1,10-fenantrolina**, que forma um complexo avermelhado medido a **510 nm**, em meio tamponado com acetato de sódio. Para o **cromo hexavalente (Cr^{6+})**, utilizou-se a **1,5-difenilcarbazida em meio ácido (H_2SO_4)**, formando um complexo violeta com absorbância máxima em **540 nm**. Já a quantificação do **cobre (Cu^{2+})** foi realizada por meio do reagente **dietilditiocarbamato de sódio (DDTC)**, com leitura da absorbância do complexo amarelo a **435 nm**, em solvente orgânico.

Utilização da Luz UV: Ao término do experimento, a solução contendo *Pistia stratiotes* e *Chlorella vulgaris* foi transferida para um sistema de refluxo equipado com lâmpadas de radiação ultravioleta (UV) e submetida à exposição contínua à radiação UV por 10 horas, garantindo a exposição uniforme da solução à radiação para eliminar algas e bactérias presentes.

Aplicação da Inteligência Artificial: Para otimizar o momento de colheita da *Pistia stratiotes* no sistema de cultivo, foi desenvolvido um código utilizando a linguagem de programação Python, no qual foram inseridas diversas imagens e vídeos previamente classificados que representavam a planta em diferentes estágios de crescimento, incluindo o ponto ideal de colheita. O sistema foi integrado a uma câmera ESP32-CAM (figura 10), posicionada de forma estratégica para captar imagens em tempo real da planta. A inteligência artificial, por meio de um modelo de reconhecimento de padrões visuais, comparava essas imagens captadas com o banco de dados treinado e, ao identificar correspondência com o estágio ótimo de desenvolvimento, emitia um alerta indicando o momento ideal para a colheita.

Figura 10 – Câmera ESP32 - CAM



Fonte: <https://www.smartkits.com.br>

Reaproveitamento da lama gerada no processo de mineração para a fabricação de tijolos ecológicos, aproveitando suas substâncias aglutinantes naturais:

A metodologia adotada baseou-se na formulação de uma mistura predominantemente composta por lama ou argila (98% em massa), utilizada como matriz estrutural do tijolo ecológico. A essa base foram incorporados de 2% de biomassa vegetal seca e triturada, proveniente das espécies *Pistia stratiotes* e *Chlorella vulgaris*, previamente utilizadas em processos de biorremediação. A adição da biomassa teve como objetivo fornecer compostos orgânicos, como lignina e polissacarídeos, capazes de atuar como aglutinantes naturais, promovendo maior coesão e resistência ao material, segundo Rêgo (2022).

A água foi adicionada gradualmente à mistura até atingir uma consistência homogênea, plástica e moldável, suficientemente úmida para permitir a conformação dos tijolos, sem, contudo, tornar-se líquida. Após a moldagem, as peças foram submetidas à secagem natural, à temperatura ambiente, por um período de 24 a 48 horas. Essa etapa foi conduzida de forma lenta e controlada, favorecendo a manutenção dos compostos orgânicos presentes na biomassa e evitando a liberação de voláteis potencialmente indesejáveis.

Na etapa seguinte, os tijolos (figura 11) foram levados à estufa, com temperatura controlada entre 40 e 60 °C, a fim de promover uma secagem uniforme e gradual.



Figura 11 – Fabricação de tijolos ecológicos



Fonte: Autoria própria (2025)

Parcerias institucionais (UFMG e UEMG) e validação técnica (Defesa Civil e Corpo de Bombeiros):

O desenvolvimento do projeto MineraEcoSmart contou com parcerias estratégicas com instituições de ensino superior e órgãos públicos, que contribuíram significativamente para a consolidação da proposta. As amostras da alga *Chlorella vulgaris* foram obtidas por meio da colaboração com o Instituto de Ciências Biológicas da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) (figura 12), que forneceu as algas para os testes de cultivo e absorção de CO₂ e metais e realizou as dosagens para determinação do teor de metais absorvidos.



Figura 12 – Parceria com a UFMG – Instituto de Ciências Biológicas



Fonte: Autoria própria (2025)

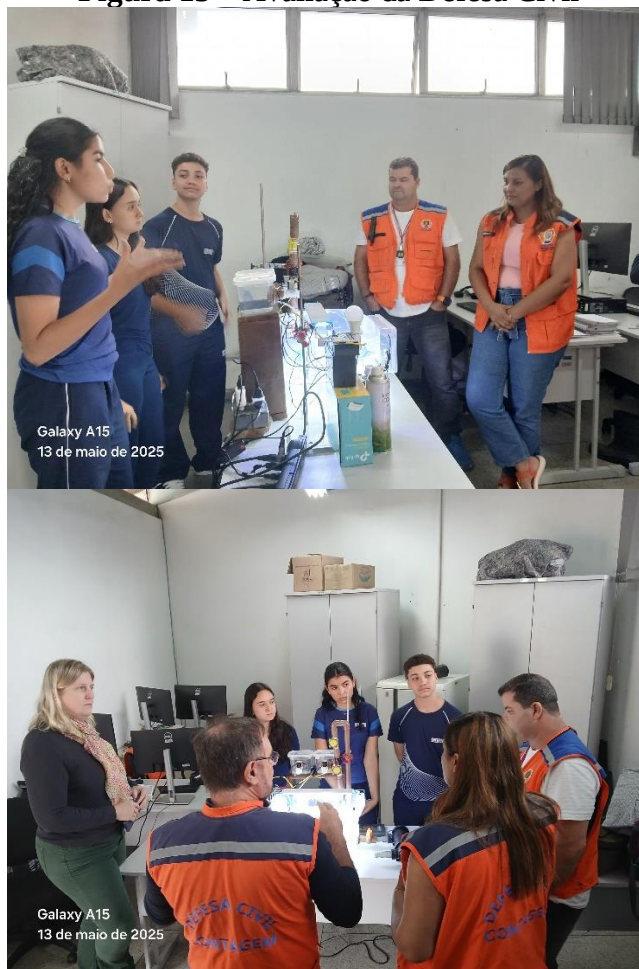
Na Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), foram conduzidos os testes físicos e estruturais dos tijolos ecológicos produzidos com a biomassa vegetal e a lama residual. O desenvolvimento do protótipo, bem como os ensaios de resistência e viabilidade técnica, contou com o apoio dos laboratórios da instituição.

Além disso, representantes da Defesa Civil (Figura 13) e do Corpo de Bombeiros de Minas Gerais (Figura 14), com experiência em situações de emergência ambiental, foram consultados durante a fase de avaliação do projeto. As contribuições desses profissionais foram essenciais para o fortalecimento da proposta, ao oferecerem orientações técnicas

valiosas relacionadas à segurança, prevenção de riscos e estratégias de resposta a possíveis eventos críticos.



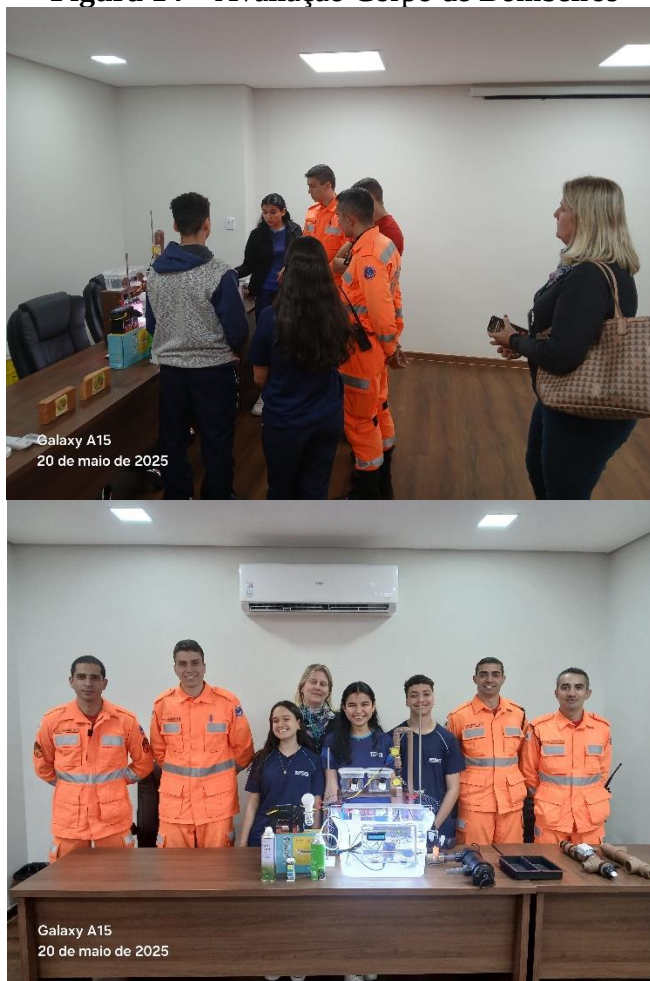
Figura 13 – Avaliação da Defesa Civil



Fonte: Autoria própria (2025)



Figura 14 – Avaliação Corpo de Bombeiros



Fonte: Autoria própria (2025)

5 RESULTADOS OBTIDOS

Injeção de CO₂

O sistema de injeção de CO₂ era acionado sempre que a válvula estava ocupada por água. O CO₂ então deslocava a água, dissolvendo-se gradualmente e atendendo à demanda das plantas e algas. Um teste indicador de CO₂ para mudanças plantadas foi instalado no sistema para determinar a quantidade ideal de gás para plantas e algas (Entre 10 e 30 mg/L). O reagente químico apresentado no teste mudava para a cor verde quando a concentração de CO₂ estivesse dentro da faixa ideal, permanecia azul caso o CO₂ estivesse fora da faixa indicada e se tornava-se amarelo quando a concentração de CO₂ ultrapassava o nível ideal.

Fonte: Equipe 1234

Sistema não automatizado: Sem dissolução de CO₂.

Sistema automatizado: Com dissolução de CO₂. As plantas e algas apresentaram um desenvolvimento superior, tanto em termos de tamanho (altura e largura), quanto na taxa de reprodução.

Luminosidade

Sistema automatizado: No sistema com controle automatizado, a iluminação artificial foi regulada por meio de uma luminária conectada ao Arduino, permitindo o controle preciso do fotoperíodo. A programação foi configurada para simular um ciclo de 12 horas de luz, com a luminária sendo acionada automaticamente às 6h da manhã e desligada às 18h. Esse controle garantiu condições constantes de luminosidade, otimizando a fotossíntese e promovendo o crescimento equilibrado das espécies aquáticas, independentemente de variações climáticas externas.

Sistema não automatizado: No sistema não automatizado, não houve qualquer controle artificial da luminosidade. As culturas foram expostas exclusivamente à luz natural, ficando sujeitas às variações diárias e climáticas de intensidade e duração da radiação solar

Sensores de pH e válvula solenoide:

Sistema automatizado: Observou-se uma elevação gradual do pH no tanque contendo *Chlorella vulgaris*. Para evitar que o pH ultrapassasse os limites ideais para o desenvolvimento das espécies aquáticas, foi implementado um mecanismo de controle automático utilizando válvulas solenóides e uma solução tampão à base de bicarbonato de sódio a 2 g/L. Quando o sensor de pH detectava valores fora da faixa ideal, definida entre 6,5 e 7,5, o Arduino acionava automaticamente a válvula, permitindo a liberação da solução reguladora. Esse sistema de correção garantiu que o pH se mantivesse estável, variando sempre entre 6,5 e 7.

Nos tanques contendo *Pistia stratiotes*, no entanto, não foi observada uma variação significativa de pH ao longo do experimento. Dessa forma, os sensores não identificaram desvios da faixa ideal, e as válvulas corretivas não foram acionadas durante o período de monitoramento.

Sistema não automatizado: No sistema sem automação, não houve qualquer controle sobre o pH da água. Em decorrência da ausência de sensores e válvulas solenóides, o pH variou livremente ao longo do experimento, sem possibilidade de correção. No caso do tanque contendo *Chlorella vulgaris*, observou-se uma elevação acentuada do pH, que atingiu valores em torno de 8,5.

Sensores oxigênio dissolvido, minigeradores, filtro biológico, controlador de carga e bateria de 12V:

Sistema automatizado: No sistema descrito, o controle do oxigênio dissolvido foi realizado por meio da implementação de uma bomba de refluxo de água, conectada a minigeradores hidráulicos. Quando a água passava pela bomba, ela movia as pás dos minigeradores, gerando energia elétrica, com uma tensão variando entre 12 e 24V. Essa energia foi captada e direcionada para um controlador de carga, que ajustava a tensão de entrada para uma bateria de 12V. A bateria, por sua vez, alimentou uma lâmpada de 12V, demonstrando o aproveitamento da energia gerada no processo.

A água, após passar pelo minigerador, era direcionada a um filtro biológico composto por carvão ativo e espumas de poliuretano, antes de serem devolvidos ao tanque. Esse retorno auxiliava na oxigenação da água, mantendo o oxigênio dissolvido dentro da faixa ideal de 5 a 10 mg/L. O monitoramento do oxigênio distribuído foi realizado por um sensor conectado ao Arduino.

Sistema não automatizado: Não houve controle de oxigênio distribuído, nem geração de energia ou filtração para remoção de metais pesados.

Aquecedor e sensor de temperatura:

Sistema automatizado: O sistema de aquecimento foi eficaz em manter a temperatura da água dentro da faixa ideal para o desenvolvimento de algas e plantas, entre 20 °C e 30 °C. O aquecedor, integrado ao tanque e controlado pelo Arduino, foi programado para ligar automaticamente sempre que a temperatura caísse abaixo de 20 °C e desligasse quando ultrapassasse os 30 °C.

Sistema não automatizado: Não houve controle da temperatura da água, o que foi examinado em variações conforme as mudanças na temperatura ambiente. A água no tanque de algas e plantas variava de temperatura sem a intervenção do aquecedor ou sensor, podendo ficar abaixo de 20 °C ou acima de 30 °C em certos períodos.

Inteligência artificial

A aplicação da inteligência artificial no monitoramento da *Pistia stratiotes* apresentou resultados positivos quanto à identificação do ponto ideal de colheita. O sistema, composto pela câmera ESP32-CAM e pelo algoritmo em Python treinado com imagens classificadas previamente, foi capaz de reconhecer com precisão os estágios de desenvolvimento da planta. Durante os testes, o modelo de IA emitiu alertas coerentes com as avaliações visuais realizadas manualmente, validando a eficiência do reconhecimento automático.

Luz Ultra Violeta (Esterelização da água) – Pós-experimento

Ao término do experimento, a solução contendo *Pistia stratiotes* e *Chlorella vulgaris* foi submetida a um processo de refluxo sob radiação ultravioleta (UV) durante 10 horas. Essa etapa teve como finalidade eliminar as algas e bactérias presentes na solução, uma vez que a radiação UV provoca danos ao DNA desses microrganismos, impedindo sua sobrevivência e proliferação. A eficácia do refluxo UV foi evidenciada pela mudança na coloração da água: antes do tratamento, a solução apresentava coloração verde intensa, típica da presença de células fotossintéticas; após o refluxo, a água tornou-se incolor, indicando a destruição das algas e a redução da biomassa microbiana.



Avaliação da eficácia do sistema integrado na melhoria da qualidade da água e na redução da contaminação por metais pesados:

Tanque com *Chlorella vulgaris*

A comparação entre os sistemas permite avaliar a influência das condições ambientais na eficiência da absorção de metais pela microalga *Chlorella vulgaris*. A seguir, os dados obtidos:

Condição	Com Controle	Sem Controle
Período do experimento	10 dias	10 dias
Células/mL – Dia 1	1.350.588	1.350.588
Células/mL – Dia 10	3.750.000	2.050.000
pH	Estável (6,5–6,8)	Não controlado (8,7 no décimo dia)
Temperatura	Controlada (20–30 °C)	Não controlada
Oxigênio Dissolvido (O ₂)	Estável (5–7 mg/L)	Não controlado
CO ₂	Estabilizado	Não controlado
Fotoperíodo	12h luz (6h–18h)	Não controlado (luz natural irregular)

Tanque com parâmetros controlados – após 10 dias

Metal	Concentração Inicial (mg/L)	Metal Total (mg/30 L)	Absorvido (mg)	% Remoção
Cu ²⁺	1,0	30,0	25,58	85,3%
Fe ²⁺	1,0	30,0	16,91	56,4%
Cr ⁶⁺	1,0	30,0	10,07	33,6%

Taque sem controle de parâmetros – após 10 dias

Metal	Concentração Inicial (mg/L)	Metal Total (mg/30 L)	Absorvido (mg)	% Remoção
Cu ²⁺	1,0	30,0	14,47	48,2%
Fe ²⁺	1,0	30,0	7,37	24,6%
Cr ⁶⁺	1,0	30,0	5,42	18,1%



Após 10 dias de experimento, a eficiência de remoção foi significativamente maior no tanque com controle de parâmetros:

- Cu^{2+} : 85,3% (com controle) vs. 48,2% (sem controle).
- Fe^{2+} : 56,4% (com controle) vs. 24,6% (sem controle).
- Cr^{6+} : 33,6% (com controle) vs. 18,1% (sem controle).

As diferenças variaram entre 15% e 38%, sendo o cobre o metal com maior taxa de remoção em ambos os sistemas. Os resultados destacam a capacidade de *Chlorella* na fitorremediação, especialmente em condições otimizadas de cultivo.

A figura 15 apresenta o experimento comparando as condições com (lado esquerdo) e sem controle de parâmetros (lado direito). Na configuração com controle, o pH foi mantido em 6,8, enquanto na condição sem controle, o pH alcançou 8,2.

Figura 15 – Experimentos com a *Chlorella vulgaris*



Fonte: Autoria própria (2025)



Tanque com a *Pistia stratiotes*

A comparação entre os sistemas com e sem controle ambiental permite avaliar a influência das variáveis físicas e químicas na eficiência da absorção de metais pesados pela planta aquática *Pistia stratiotes*. A seguir, os dados obtidos:

Parâmetro	Tanque com Controle	Tanque sem Controle
Período do experimento	10 dias	10 dias
pH	Estável (6,5 – 6,8)	Não controlado
Temperatura	Controlada (20 – 30 °C)	Não controlada
Oxigênio Dissolvido (O ₂)	Estável (5 – 7 mg/L)	Não controlado
CO ₂	Estabilizado	Não controlado
Fotoperíodo	12 horas luz (6h – 18h)	Luz natural irregular

Tanque com parâmetros controlados – após 10 dias

Metal	Concentração Inicial (mg/L)	Metal Total (mg/30 L)	Absorvido (mg)	% Remoção
Cu ²⁺	1,0	30,0	16,70	55,68%
Fe ²⁺	1,0	30,0	10,13	33,78%
Cr ⁶⁺	1,0	30,0	8,69	28,98%

Tanque sem controle de parâmetros – após 10 dias

Metal	Concentração Inicial (mg/L)	Metal Total (mg/30 L)	Absorvido (mg)	% Remoção
Cu ²⁺	1,0	30,0	7,43	24,78%
Fe ²⁺	1,0	30,0	6,60	22,0%
Cr ⁶⁺	1,0	30,0	5,27	17,56%

Após 10 dias de experimento, observou-se que o tanque com controle de parâmetros apresentou índices de remoção significativamente superiores:

- Cu²⁺: 55,68% (com controle) vs. 24,78% (sem controle)
- Fe²⁺: 33,78% (com controle) vs. 22,00% (sem controle)
- Cr⁶⁺: 28,98% (com controle) vs. 17,56% (sem controle)



As diferenças de eficiência variaram entre 11% e 31%, com destaque para o cobre, cuja remoção foi mais que o dobro no sistema controlado. Esses resultados reforçam a importância do controle dos parâmetros físico-químicos da água para potencializar a fitorremediação com *Pistia stratiotes*.

Ao longo dos 10 dias de acompanhamento, observou-se o crescimento de novas raízes e o surgimento de brotações laterais, originando novas plantas (figura 16).

Figura 16 – Experimentos com a *Pistia stratiotes*



Fonte: Autoria própria (2025)

Parcerias UFMG e UEMG e validação da Defesa Civil e Corpo de Bombeiros:

As parcerias com a UFMG e a UEMG foram fundamentais para o fortalecimento técnico-científico do projeto, contribuindo com orientações, análises e validações dos resultados. Já a colaboração com a Defesa Civil e o Corpo de Bombeiros foi essencial para a aplicação prática dos dados obtidos. Segundo esses órgãos, os resultados demonstraram que a proposta pode ser utilizada na prevenção de situações de risco, pois evita a geração de



resíduos sólidos e promove a absorção de metais pesados, contribuindo para a redução do risco químico em ambientes aquáticos.

Divulgação dos Resultados e Reconhecimento Setorial: Integração entre Indústria, Academia e Sociedade

Os resultados obtidos foram apresentados às mineradoras durante a reunião da Câmara de Metalurgia e Mineração da FIEMG (Figura 17), evento que contou com a presença de proprietários de indústrias de mineração e representantes do setor. Na ocasião, os participantes reconheceram a relevância do trabalho e demonstraram interesse em sua aplicação prática, chegando a convidar a equipe responsável para dar continuidade ao projeto em suas respectivas empresas.

Figura 17 – Reunião na câmara de metalurgia e mineração da FIEMG



Fonte: Autoria própria (2025)

Além disso, os resultados foram divulgados à comunidade acadêmica e ao público em geral durante o EBA – Encontro de Educação Botânica e Ambiental, realizado na UFMG (Figura 18), assim como em eventos promovidos pela Secretaria de Meio Ambiente de Belo Horizonte, realizados em praças públicas da cidade, ampliando o alcance e o impacto social da pesquisa. O trabalho também já foi apresentado à comunidade quilombola Arturos, em



Contagem (Figura 19), que já utiliza as plantas e algas para a redução de poluentes em suas nascentes.

Figura 18 – EBA – Encontro de educação botânica e ambiental na UFMG



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 19 – Comunidade quilombola dos Arturos em Contagem-MG



Fonte: Autoria própria (2025)

6 CONCLUSÕES OU CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo evidenciou que o uso de sistemas automatizados contribui significativamente para o controle preciso de variáveis ambientais no cultivo de algas e plantas aquáticas, promovendo a purificação da água e o desenvolvimento de tecnologias aplicáveis a diferentes contextos sociais e industriais. A abordagem adotada reforça a importância da integração entre automação, biofiltração e educação STEM (Ciência, Tecnologia, Engenharia e Matemática), gerando resultados consistentes na melhoria da qualidade da água, no desempenho das espécies cultivadas e na formação de multiplicadores de conhecimento.

A automação da injeção de dióxido de carbono (CO_2) manteve concentrações ideais para o crescimento de *Chlorella vulgaris* e *Pistia stratiotes*, promovendo desenvolvimento mais rápido e taxas reprodutivas elevadas. No sistema manual, a ausência de controle contínuo limitou o crescimento. O monitoramento de pH por sensores e válvulas garantiu estabilidade ao sistema automatizado, corrigindo variações imediatamente, enquanto no modelo não automatizado tal controle não era possível.

O controle da temperatura, mantida entre 20 °C e 30 °C, mostrou-se essencial para o metabolismo das espécies aquáticas e foi viabilizado pelo sistema automatizado. Além disso, o sistema de refluxo da água foi integrado a minigeradores hidráulicos, proporcionando oxigenação constante e geração de energia complementar, com auxílio de sensores de oxigênio dissolvido.

A eficiência do sistema foi evidenciada pela maior capacidade de absorção de metais como ferro, cobre e cromo, especialmente no tanque automatizado, demonstrando o potencial de biofiltros e automação para melhoria da qualidade da água em áreas industriais e comunidades com histórico de poluição. No reaproveitamento de resíduos, a combinação de biomassa vegetal com lama industrial possibilitou a produção de tijolos sustentáveis, reforçando a viabilidade de soluções ecológicas e de tecnologia social com baixo impacto ambiental.

A esterilização da água por radiação ultravioleta (UV) mostrou-se eficaz na eliminação de microrganismos sem adição de produtos químicos, consolidando seu uso em sistemas sustentáveis de tratamento de água.

O trabalho teve ampla aplicação social e institucional: foi apresentado à comunidade quilombola Arturos, em Contagem, que já utiliza plantas e algas para reduzir poluentes em suas nascentes; divulgado em eventos da UFMG, fortalecendo a divulgação científica e a formação de multiplicadores; e compartilhado com indústrias por meio de reuniões na FIEMG, evidenciando o potencial do sistema automatizado para redução da geração de resíduos e melhoria da qualidade da água em processos produtivos.

Em resumo, o sistema automatizado proposto apresentou resultados positivos em todos os aspectos analisados, oferecendo uma alternativa eficiente, de baixo custo e com potencial de aplicação prática em diferentes regiões, comunidades e setores industriais, ao mesmo tempo em que fortalece a educação científica e tecnológica por meio da integração entre sustentabilidade, inovação e reaproveitamento de recursos.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **ANM e Ministério Público Federal debatem impactos socioambientais relacionados à mineração no Brasil**. Brasília: ANM, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/noticias/anm-e-ministerio-publico-federal-debatem-impactos-socioambientais-relacionados-a-mineracao-no-brasil>. Acesso em: 5 abril 2025.

COSTA, M. L. et al. Aproveitamento de rejeitos de minério em tijolos ecologicamente viáveis para o processo construtivo. **Revista de Engenharia Sustentável**, v. 8, n. 1, p. 30-42, 2025. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/388279185_APROVEITAMENTO_DE_REJEITOS_DE_MINERIO_EM_TIJOLOS_ECOLOGICAMENTE_VIAVEIS_PARA_O_PROCESSO_CONSTRUTIVO_USE_OF_MINERAL_WASTE_IN_ECOLOGICALLY_VIABLE_BRICKS_FOR_THE_CONSTRUCTION_PROCESS. Acesso em: 2 de maio 2025.

RIBEIRO, M. A.; MARTINS, L. F. Impactos ambientais causados pela mineração: uma análise da percepção de pequenos mineradores do município de Frei Martinho - PB. **Revista de Geografia**, v. 36, n. 2, p. 123-140, 2019. ResearchGate

SANTANA, J. F. et al. Aplicação de minigeradores hidráulicos em sistemas de tratamento de água. **Revista de Tecnologias Sustentáveis**, v. 12, n. 3, p. 55-68, 2020.

SILVA, J. P. et al. **Impactos ambientais ocasionados pela mineração no Brasil: uma revisão sobre levantamento de minas**. Anais do IV Congresso Nacional de Recursos Ambientais, 2020. Disponível em: https://iea.unifesspa.edu.br/images/EVENTOS/2022/IVCONARA/ARTIGOS/28_Impactos_ambientais_ocasionados_pela_minerao_no_Brasil_uma_reviso_sobre_levantamento_de_minas.pdf. Acesso em: 11 maio 2025. iea.unifesspa.edu.br

SOUZA, Eduardo. **Concreto feito de cana-de-açúcar: de resíduo agrícola a estruturas sustentáveis**. *ArchDaily Brasil*, 11 jun. 2023. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/1001541/concreto-feito-de-cana-de-acucar-de-residuo-agricola-a-estruturas-sustentaveis>. Acesso em: 2 abril 2025.

RÊGO, D. S. Produção de tijolos ecológicos com resíduos de papelão, pó de serraria e gesso. **Revista Contemporânea**, v. 10, n. 2, p. 45–60, 2022.

TEIXEIRA, J. A.; SILVA, M. F.; OLIVEIRA, R. L. Utilização de resíduos lignocelulósicos na produção de tijolos de adobe. **Revista Brasileira de Engenharia Sustentável**, v. 5, n. 1, p. 25–35, 2012.

VIEIRA, L. M. et al. Integração de tecnologias sustentáveis na mineração: uma abordagem inovadora. **Revista Brasileira de Engenharia Ambiental**, v. 15, n. 1, p. 22-35, 2022.