

SEVEN

PUBLICAÇÕES ACADÊMICAS
2025

TECNOLOGIAS INOVADORAS DA ENGENHARIA DE MINAS: Eficiência, Gestão e Sustentabilidade

Jônatas Franco Campos da Mata, Herbert Souza e Silva,
Gerson Ferreira da Silva, Luana Alves de Lima



EDITORIA CHEFE

Prof^o Me. Isabele de Souza Carvalho

EDITOR EXECUTIVO

Nathan Albano Valente

ORGANIZADORES DO LIVRO

Jônatas Franco Campos da Mata

Herbert Souza e Silva

Gerson Ferreira da Silva

Luana Alves de Lima

2025 by Seven Editora

Copyright © Seven Editora

Copyright do Texto © 2025 Os Autores

Copyright da Edição © 2025 Seven Editora

PRODUÇÃO EDITORIAL

Seven Publicações Ltda

EDIÇÃO DE ARTE

Evellyn Thais de Souza

EDIÇÃO DE TEXTO

Natan Bones Petitemberte

BIBLIOTECÁRIA

Bruna Heller

IMAGENS DE CAPA

Evellyn Thais de Souza

O conteúdo do texto e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Seven Publicações Ltda. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Seven Publicações Ltda é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação.

Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.



O conteúdo deste Livro foi enviado pelos autores para publicação de acesso aberto, sob os termos e condições da Licença de Atribuição Creative Commons 4.0 Internacional

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

T255

Tecnologias Inovadoras da Engenharia de Minas [recurso eletrônico] : Eficiência, Gestão e Sustentabilidade / Jônatas Franco Campos da Mata ... [et al.]. – São José dos Pinhais, PR: Seven Editora, 2025.
Dados eletrônicos (1 PDF).

Inclui bibliografia.

ISBN 978-65-6109-200-5

1. Engenharia. 2. Gestão. 3. Sustentabilidade. I. Mata, Jônatas Franco Campos da. II. Silva, Herbert Souza e. III. Silva, Gerson Ferreira da. IV. Lima, Luana Alves de. V. Título.

CDU 62

Bruna Heller - Bibliotecária - CRB10/2348

Índices para catálogo sistemático:

CDU: Tecnologia, engenharia 62

DOI: 10.56238/livrosindi202529-

Seven Publicações Ltda
CNPJ: 43.789.355/0001-14
editora@sevenevents.com.br
São José dos Pinhais/PR

ORGANIZADORES DO LIVRO

Jônatas Franco Campos da Mata



Jônatas Franco Campos da Mata é natural de Lavras, no estado de Minas Gerais. Possui graduação em Engenharia de Minas (1994) pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), mestrado em Ciências e Tecnologia de Radiações, Minerais e Materiais (2016) pelo Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) e doutorado em Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas (2022) pela UFMG. Além disso, possui especialização em Gerenciamento de Projetos (2014) pela Fundação Getúlio Vargas.

É professor efetivo do curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Campus Janaúba, na região Norte de Minas Gerais, atuando em projetos de ensino, pesquisa e extensão. Tem se dedicado às seguintes linhas de pesquisa: automação de equipamentos de mineração, geoprocessamento, métodos geofísicos de prospecção mineral, geometalurgia, inteligência artificial, ESG, tecnologias aplicadas ao aproveitamento de minérios, fechamento de mina, minerais aplicados à produção de energia limpa, metodologias ativas de aprendizagem, assessoria a minerações e outras questões.

Possui experiência consolidada como Engenheiro de Minas em empresas de mineração. Seu foco dirigiu-se às seguintes especialidades: pesquisa mineral, planejamento de mina, desenvolvimento e lavra, operação de usina de beneficiamento mineral, processos e gerenciamento de projetos mineiros.

Herbert Souza e Silva



Natural de Curvelo/MG, Herbert desenvolveu sua trajetória acadêmica e profissional no Norte de Minas Gerais. Graduiu-se em Ciências Biológicas (2009) pela Universidade Estadual de Montes Claros (UNIMONTES), na cidade de Montes Claros, região Norte de Minas Gerais. Nesta instituição, também concluiu o mestrado em Biodiversidade e Uso dos Recursos Naturais (2012). Posteriormente, ampliou sua formação ao obter o título de Engenheiro de Minas (2017) pelas Faculdades Integradas Pitágoras (FIPMoc), em Montes Claros.

Ao longo dos anos, atuou em diversas instituições de ensino, como o IFNMG, UAB/UNIMONTES e UFVJM, consolidando sua experiência em educação a distância e ensino superior presencial. Atualmente, é professor do curso de Engenharia de Computação no Centro Universitário UNIFIPMoc e instrutor técnico do SENAR.

Sua atuação está voltada para temas como geoprocessamento, aerofotogrametria com drones, consultoria ambiental e minerária, além da elaboração de estudos técnicos como planos de fechamento de mina, relatórios espeleológicos e processos de outorga de recursos hídricos. Valoriza a integração entre ensino, pesquisa e extensão, com foco em soluções sustentáveis e tecnológicas aplicadas à engenharia e ao meio ambiente.

Gerson Ferreira da Silva

Gerson Ferreira da Silva tem formação em Engenharia de Minas (2004) pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), mestre (2019) em Engenharia de Minas e Petróleo pela mesma instituição e doutor (2023) em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Possui especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho e outras formações complementares nas áreas de geotecnologia, inteligência artificial e ensino a distância.



Atualmente é professor efetivo da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Campus Janaúba, no norte de Minas Gerais. Ministra as disciplinas de Lavra de Mina a Céu Aberto, Lavra Subterrânea, e Perfuração e Desmonte de Rochas. Coordena projetos de pesquisa, ensino e extensão voltados à sustentabilidade na mineração, reaproveitamento de resíduos minerais e educação tecnológica. Também participa ativamente de comissões acadêmicas e colegiados da instituição.

Apresenta experiência consolidada na indústria de mineração, atuou como responsável técnico em empresas mineradoras e como engenheiro de minas em órgãos públicos, com ênfase em licenciamento ambiental. É autor de diversos artigos científicos, capítulos de livros e trabalhos apresentados em congressos nacionais e internacionais. Entre seus temas de pesquisa destacam-se o beneficiamento de minerais industriais, a recuperação de áreas degradadas e o uso de tecnologias digitais aplicadas à mineração.

Luana Alves de Lima

Luana Alves de Lima é natural da cidade do Rio de Janeiro, do estado homônimo. É hidrogeóloga e atua como professora no Instituto de Engenharia, Ciência e Tecnologia (IECT) da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), no Campus de Janaúba, situada no Norte de Minas Gerais. Com uma sólida formação em Geologia (2007), construída na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), onde também concluiu seu mestrado (2009), Luana aprofundou seus estudos em Geociências com ênfase em Geoquímica Ambiental no doutorado (2019) realizado na Universidade Federal Fluminense (UFF).



Sua trajetória acadêmica e profissional se destaca pela dedicação à compreensão das dinâmicas hidrogeoquímicas dos aquíferos, especialmente em ambientes costeiros. Durante o doutorado, concentrou suas pesquisas na Bacia de Campos (RJ), uma região estratégica para a exploração de petróleo no Brasil. Nesse contexto, investigou a interação entre águas subterrâneas e águas de formação, abordando questões cruciais como a intrusão salina, a contaminação por águas residuais da indústria petrolífera e os impactos ambientais associados à exploração desses recursos.

Além de sua atuação na área de petróleo, Luana também desenvolve pesquisas e atividades docentes nas áreas de geoprocessamento, geologia ambiental e hidrogeologia de aquíferos fraturados. Suas aulas contemplam disciplinas como Hidrogeologia, Geoprocessamento, Estratigrafia e Educação Ambiental, contribuindo para a formação de engenheiros e cientistas com uma visão crítica e integrada dos desafios ambientais contemporâneos.

Seu trabalho combina excelência científica com um forte compromisso com a sustentabilidade e a gestão responsável dos recursos hídricos, tornando-se referência em sua área de atuação.

APRESENTAÇÃO

A Engenharia de Minas é um campo em constante transformação, impulsionado pelo avanço tecnológico, pela busca contínua por eficiência operacional e, sobretudo, por um compromisso crescente com a sustentabilidade e a responsabilidade socioambiental. Neste cenário desafiador e inspirador, nasce o livro *Tecnologias Inovadoras da Engenharia de Minas: Eficiência, Gestão e Sustentabilidade*, que reúne temas cruciais e atuais da área em uma abordagem didática e comprometida com a formação de profissionais qualificados.

Cada capítulo desta obra reflete o empenho dos autores em abordar, de maneira acessível, tópicos essenciais à Engenharia de Minas, como a gestão de recursos hídricos, preservação ambiental, ventilação em minas subterrâneas, sistemas de despacho e planejamento de curto prazo, além de tecnologias emergentes, como o uso da geofísica de eletrorresistividade, drones e sensoriamento remoto aplicados à mineração e à segurança de barragens.

Os autores deste livro têm se dedicado ao ensino, pesquisa e extensão em instituições de ensino superior situadas na região Norte de Minas Gerais: Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM) – Campus Janaúba e Centro Universitário UNIFIPMoc – Campus Montes Claros. A região norte de Minas é, notadamente, marcada por baixos indicadores sociais e clima semiárido. Tais dificuldades reforçam o papel transformador da educação na vida dos estudantes e da própria sociedade do entorno destas instituições, bem como iniciativas como a publicação do presente livro alinham-se a esta importante missão.

Mais do que um compêndio técnico, este livro é fruto da tradição das instituições envolvidas, que têm formado engenheiros comprometidos com o progresso sustentável do setor mineral. A combinação entre solidez acadêmica, inovação e aplicabilidade prática faz desta obra um material de referência para estudantes e profissionais que atuam ou desejam atuar na Engenharia de Minas contemporânea.

Ao apresentar este livro, destacamos não apenas a relevância dos temas discutidos, mas também o compromisso ético e pedagógico dos autores em contribuir com uma engenharia mais eficiente, inteligente e responsável. Convidamos o leitor a embarcar nesta jornada de conhecimento que alia técnica, visão crítica e sensibilidade para os desafios do presente e as possibilidades do futuro.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....8-27

  10.56238/livrosindi202529-001

USO DA GEOFÍSICA DE ELETRORRESISTIVIDADE COMO FERRAMENTA PARA CARACTERIZAÇÃO DE UMA DOLINA EM ÁREA DE USINA FOTOVOLTAICA NO NORTE DE MINAS GERAIS

Herbert Souza e Silva, João Victor da Silva Barbosa, Jônatas Franco Campos da Mata, Claydson Ferreira Faria.

CAPÍTULO 2.....28-50

  10.56238/livrosindi202529-002

REVISÃO ACERCA DA UTILIZAÇÃO DE AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS (RPA) NA INDÚSTRIA DA MINERAÇÃO

Gustavo Barbosa Soares, Herbert Souza e Silva, Jônatas Franco Campos da Mata.

CAPÍTULO 3.....51-70

  10.56238/livrosindi202529-003

DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTAÇÃO TRANSMISSORA AUTÔNOMA PIEZOMÉTRICA: SENSORIAMENTO REMOTO PARA BARRAGENS

Farley Cardoso Fonseca, Herbert Souza e Silva, Luiz Carlos Brant, Ruy Kennedy Almeida, Jônatas Franco Campos da Mata.

CAPÍTULO 4.....71-90

  10.56238/livrosindi202529-004

SISTEMA DE VENTILAÇÃO DE UMA MINA SUBTERRÂNEA E POSSÍVEIS TRATATIVAS

Daiane Aparecida Nascimento, Gerson Ferreira da Silva.

CAPÍTULO 5.....91-106

  10.56238/livrosindi202529-005

UTILIZAÇÃO DO SISTEMA DE DESPACHO VISANDO MELHORIAS NA PRODUÇÃO DE UMA MINA SUBTERRÂNEA

Augusto Biancart Souza Miranda, Gerson Ferreira da Silva.

CAPÍTULO 6.....107-130

  10.56238/livrosindi202529-006

O PAPEL DO PLANEJAMENTO DE CURTO PRAZO NA OPERAÇÃO DE LAVRA EM MINAS A CÉU ABERTO

Maria Cecília Nogueira Teles, Gerson Ferreira da Silva.

CAPÍTULO 7.....131-155

  10.56238/livrosindi202529-007

MATERIAIS E TÉCNICAS DE PERFURAÇÃO DE POÇOS NO NORTE DO ESTADO DE MINAS GERAIS COMO ALTERNATIVA DE ABASTECIMENTO HÍDRICO

Alessandra Vitória de Jesus, Jonatas Franco Campos da Mata, Jheimisson Luiz Santos, Luana Alves de Lima.

CAPÍTULO 8.....156-172

 [10.56238/livrosindi202529-008](https://doi.org/10.56238/livrosindi202529-008)

ESTUDO SOBRE METODOLOGIAS DE MAPEAMENTO DE VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS EM REGIÕES DE CLIMA SEMIÁRIDO

Luiz Thiago Santos Teixeira, Jonatas Franco Campos da Mata, Jheimisson Luiz Santos, Juliana Magalhães Meneses, Luana Alves de Lima.

USO DA GEOFÍSICA DE ELETRORRESISTIVIDADE COMO FERRAMENTA PARA CARACTERIZAÇÃO DE UMA DOLINA EM ÁREA DE USINA FOTOVOLTAICA NO NORTE DE MINAS GERAIS

  10.56238/livrosindi202529-001

Herbert Souza e Silva

Biólogo (2009) pela UNIMONTES, Engenheiro de Minas (2017) pelas Faculdades Integradas Pitágoras
Mestre (2012) em Ciências Biológicas e Especialista (2013) em EAD pela UNIMONTES
Docente Efetivo do curso de Engenharia de Computação da UNIFIPMoc, Montes Claros, Brasil
E-mail: herbert.silva@unifipmoc.edu.br

João Victor da Silva Barbosa

Bacharel (2023) em Ciência e Tecnologia e Discente de Engenharia de Minas pela UFVJM, Janaúba, Brasil
E-mail: joao.barbosa@ufvjm.edu.br

Jônatas Franco Campos da Mata

Engenheiro de Minas (1994) pela UFMG, Especialista (2012) em Gerenciamento de Projetos pela FGV
Mestre (2016) em Ciência e Tecnologia de Radiações, Minerais e Materiais pelo CDTN
Doutor (2022) em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas pela UFMG
Professor Adjunto do curso de Engenharia de Minas da UFVJM, Janaúba, Brasil
E-mail: jonatas.mata@ufvjm.edu.br

Claydson Ferreira Faria

Geólogo (2005) pela UFMG
Mestre (2011) em Geologia Aplicada pela UFMG
E-mail: claydsonf@gmail.com

RESUMO

A tomografia elétrica, ou eletrorresistividade, é uma técnica geofísica não invasiva usada para prospecção de minerais, localização de poços tubulares e trabalhos de geotecnia. No norte de Minas Gerais, regiões cársticas com rochas calcárias apresentam cavidades subterrâneas formadas pela dissolução das rochas pela água. Este estudo visa identificar a composição dos materiais e classificar geofisicamente uma dolina localizada em uma usina fotovoltaica no município de Francisco Sá/MG. Foram realizados cinco levantamentos geoeletricos, sendo quatro levantamentos em direção aproximada S-SO para N-NE e um na direção de O-NO para L-SE, com espaçamento de 25m entre estações (eletrodos) e atingindo cerca de 85m de profundidade. As análises indicam uma possível propagação da deformação em direção à porção sul, como é possível concluir ao analisar os dados dos caminhamentos elétricos, região sul, onde os quatro caminhamentos paralelos tiveram origem. Somado a isso, os dados geofísicos sugerem que a norte da dolina o substrato calcário possui os mesmos ingredientes que favorecem o desenvolvimento da deformação para o norte. Apesar dos claros resultados encontrados, é sugerido a realização de sondagem direta, para a confirmação os dados dos modelos geoeletricos.

Palavras-chave: Geofísica de eletrorresistividade, Dolina, Geologia aplicada.

1 INTRODUÇÃO

Os métodos geoeletricos são técnicas de geofísica que envolvem a indução de correntes elétricas no subsolo, permitindo a análise de seu comportamento por meio de medições na superfície ou examinando os campos elétricos naturais presentes nas rochas do interior da Terra (Kearey *et al.*, 2002). Tal técnica é amplamente empregada na prospecção de bens minerais, localização de poços tubulares e trabalhos de geotecnia.

A geofísica de eletorresistividade é não invasiva, mas eficaz, permitindo detectar contrastes de condutividade elétrica em diversos materiais e estruturas geológicas (Gandolfo, 2007). Além disto, o método eletorresistivo caracteriza-se pela medida da diferença de potencial entre dois pontos, devido à excitação de um substrato rochoso por campos elétricos artificiais criados pela injeção no solo de uma corrente elétrica contínua ou de baixa frequência. Geralmente os dados obtidos são correlacionados com informações geológicas locais para inferir a estrutura geológica da área estudada (Rios, 2019).

O método eletorresistivo caracteriza-se pela medida da diferença de potencial entre dois pontos, devido à excitação de um substrato rochoso por campos elétricos artificiais criados pela injeção no solo de uma corrente elétrica contínua ou de frequência muito baixa. Portanto, mapeando-se a distribuição do potencial elétrico por meio de dois pontos, obtém-se a resistividade elétrica das rochas, que depende de fatores como: seu conteúdo em fluido, a constituição mineralógica, a textura e a estrutura do material. Por se tratar de uma aplicação não invasiva, além de ser de rápida resposta, a geofísica é indicada para diversos sistemas em subsuperfície (Canatto, 2021).

Os diferentes tipos de materiais existentes nos ambientes geológicos apresentam, como uma de suas propriedades fundamentais, o parâmetro físico de resistividade elétrica, o qual reflete algumas de suas características, servindo para caracterizar seus estados, em termos de alteração, fraturamento, saturação, etc., e até identificá-los litologicamente, sem necessidade de escavações físicas (Braga, 2007).

Logo, a resistividade das rochas, está amarrada em diversas condições, para que apenas um valor único possa representar certo tipo litológico. Um determinado tipo litológico pode proporcionar, deste modo, uma ampla gama de variação nos valores de resistividade, como relatado em Braga (2007), particularmente, os minerais são razoavelmente consistentes em suas propriedades elétricas, mas num conjunto, como ocorrem as rochas na natureza, a variação total de suas resistividades é muito maior.

De acordo com Braga (2007), para correlacionar de modo mais adequado com a geologia em uma determinada área de estudo, são necessários a localização geográfica e o conhecimento da geologia local em termos estratigráficos. O norte de Minas Gerais é, em grande parte, caracterizado

pelo ambiente cárstico, ambiente este que apresenta uma alta incidência de cavidades subterrâneas, característica relacionada à presença de rochas calcárias na região. Regiões cársticas são formadas por rochas solúveis, como o calcário, que são facilmente erodidas pela água, formando cavidades subterrâneas. Essas cavidades podem variar em tamanho e forma, desde pequenas fendas até grandes cavernas, e são influenciadas pela geologia local e pelo regime hidrogeológico da região (Oliveira, 2000).

É importante ressaltar que a evolução dos processos de carstificação encontra-se constantemente integrada a três importantes fatores: pluviometria (volume de águas), características litológicas (composição mineralógica) e condições estruturais (especialmente sistemas de falhas e fraturas) (Travassos, 2019).

A água é fundamental para os processos de carstificação. O contato entre as águas das chuvas, com o gás carbônico do ar e dos solos, promove a formação do ácido carbônico, que dissolve rochas carbonáticas e precipita calcita ($\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 = \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$). As características das rochas são importantes, sendo as carbonáticas as mais suscetíveis à dissolução (Vieira, 2016).

A dissolução e desenvolvimento dos aquíferos cársticos estão diretamente relacionados com elementos estruturais, como falhas e fraturas, que facilitam a circulação da água subterrânea. De forma geral, o fenômeno cárstico ocorre devido à circulação da água em rochas carbonáticas. As feições cársticas incluem dolinas, depressões circulares formadas pela dissolução das rochas, e sumidouros, áreas que permitem a rápida infiltração da água para o subsolo (Christofolletti, 1980).

Os processos de formação de dolinas, por sua vez, envolvem diferentes aspectos, sendo os principais aspectos relacionados aos mecanismos erosivos como a dissolução ou ação mecânica, os tempos diferenciados como o tempo geológico, histórico ou repentino e de acordo com os diferentes materiais, como coberturas móveis, rochas carstificáveis ou outro tipo de rocha. A dinâmica dos processos de formação e desenvolvimento de dolinas é geralmente classificada como dissolução, colapsos ou subsidências (Beck, 2012).

Desta forma, este estudo tem como objetivo identificação da composição dos materiais, ocorrências locais e classificação geofísica de uma dolina em área de usina fotovoltaica no município de Francisco Sá, localizado no norte de Minas Gerais.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo se encontra no noroeste do município de Francisco Sá, limite com o município de Capitão Enéias, localizadas no norte do estado de Minas Gerais (Figura 1).

Figura 1. Localização e acesso a área do estudo

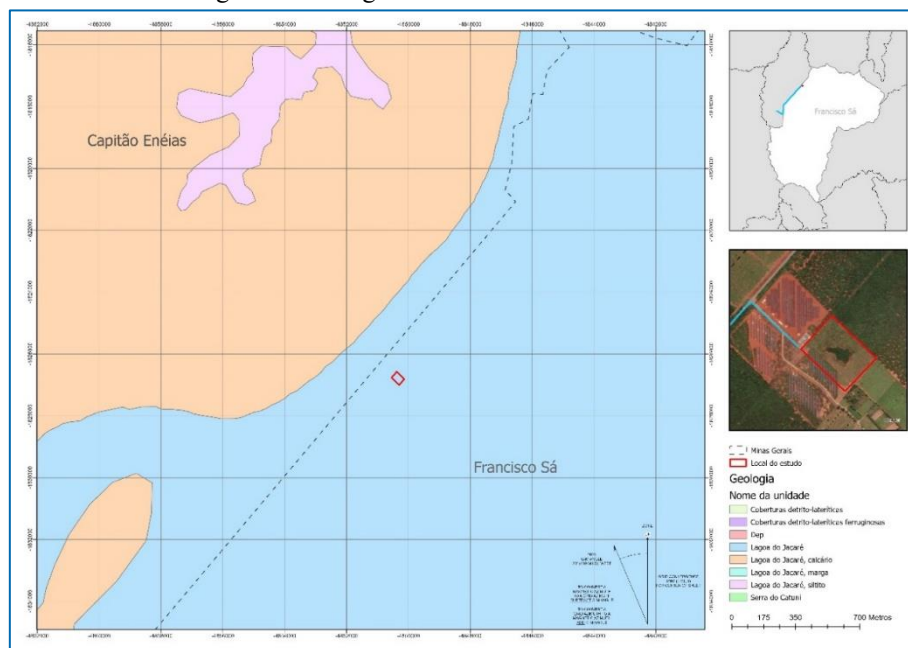


Legenda: Rota, da cidade mais próxima (Capitão Enéias) ao empreendimento onde foi realizado o estudo (em azul) e, em vermelho, a área onde foi realizado o estudo.

2.2 GEOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada na Formação Lagoa do Jacaré (Figura 2), composta por calcários pretos a cinza, oolíticos e pisolíticos, brechas intraclásticas, margas, siltitos e folhelhos verdes. Os calcários são encontrados em camadas paralelas de 10 a 20 cm, com sinais de recristalização intensa, nódulos de *chert* e cheiro fétido quando quebrados. Existem também marcas onduladas, gretas de ressecamento e estruturas de estratificações cruzadas por ondas. A formação indica uma sedimentação regressiva, com plataformas carbonáticas sujeitas a retrabalhamento e tempestades, intercaladas com períodos de calmaria. Gretas de ressecamento sugerem emersão temporária da plataforma. A presença de calcários negros e pirita indica condições de sedimentação redutoras e atividade orgânica intensa.

Figura 2. Geologia da área de estudo e seu entorno

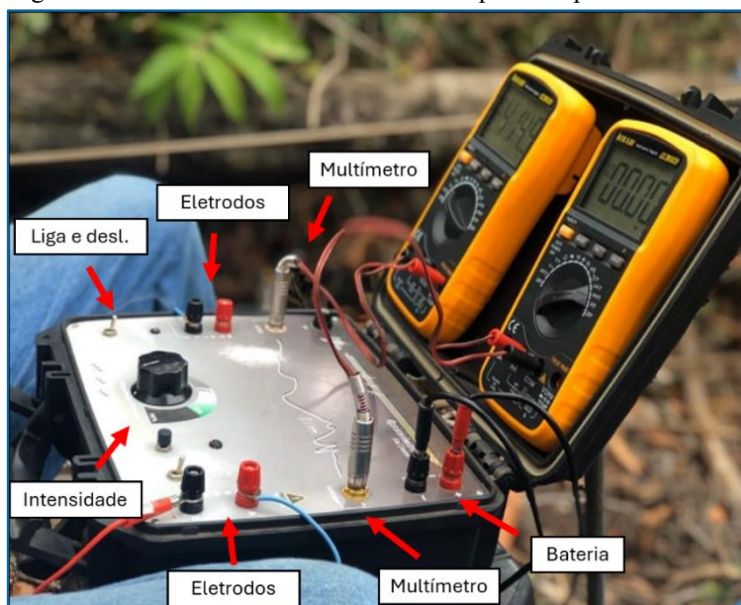


Legenda: Localização, em vermelho, da área de estudo. Sistema de Coordenadas UTM; Datum: SIRGAS 2000.

2.3 COLETA DE DADOS

Para o estudo e levantamento de dados, foram utilizadas cartas geológicas e hidrogeológicas digitalizadas em diferentes escalas, além de equipamentos específicos. Para os levantamentos de eletrorresistividade, foi utilizado um eletrorresistímetro da Auto Energia, modelo X5 de dezesseis canais, com dois multímetros digitais da Hikari, modelo HM-2090 (Figura 3). Também foram utilizados cabos de conexão elétrica, trenas, eletrodos de alumínio para envio de corrente elétrica e leitura do potencial, e um GPS portátil eTrex 10 Garmin para georreferenciamento dos locais de estudo.

Figura 3. Eletorresistivímetro X5 utilizado para a captura dos dados.



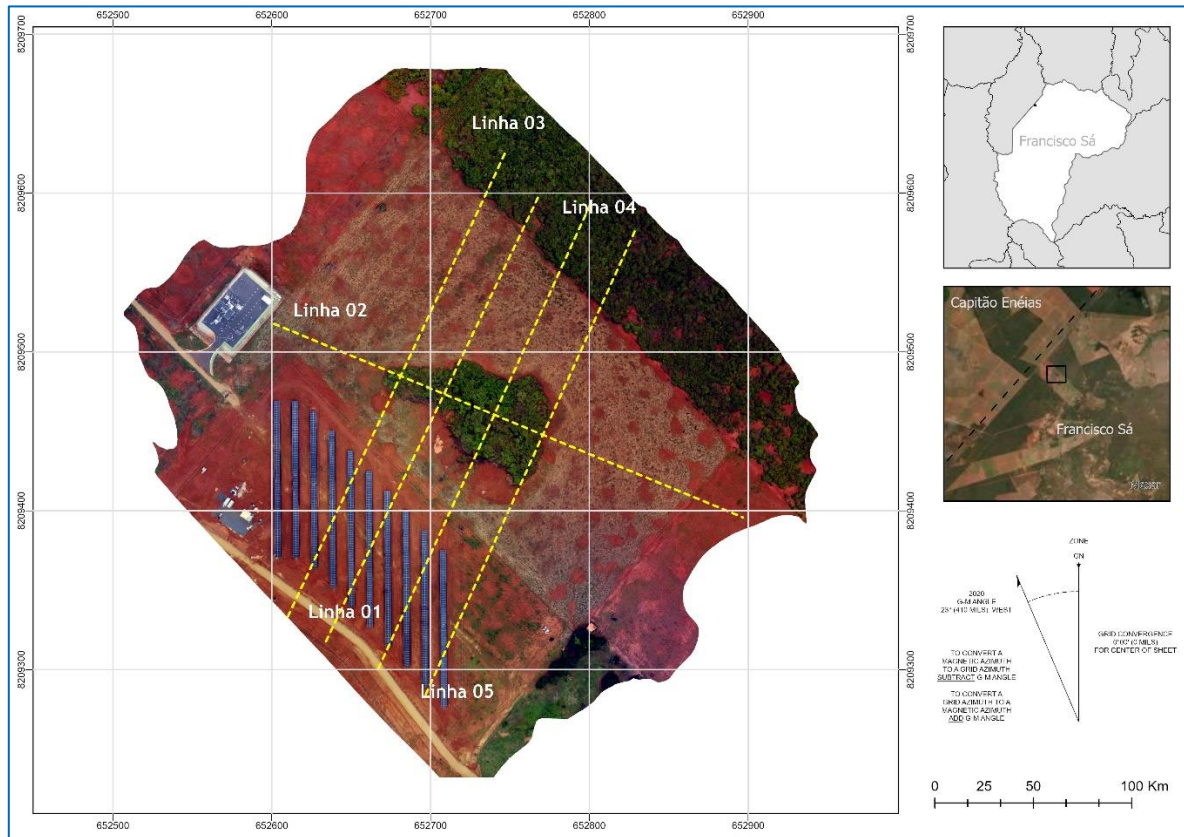
Legenda: As indicações na imagem representam os itens necessários para o levantamento de dados, ligados ao eletorresistivímetro.

O estudo utilizou dados morfológicos de relevo e drenagem, mapeados e integrados em um sistema de informação geográfica (SIG) com o auxílio dos *softwares* ArgGIS Pro, Global Mapper 19. Foram definidos perfis geofísicos para investigar uma área com dolina, com alinhamentos para cobrir toda a região e mapear diferentes direções. Os levantamentos de eletorresistividade foram feitos com o arranjo dipolo-dipolo, buscando variações laterais na resistividade para mapear contatos geológicos e estruturas. Foram realizados dois levantamentos em cada linha para melhor resolução. As medidas coletadas em campo foram interpoladas para gerar pseudo-seções da resistividade aparente, que são analisadas qualitativamente para identificação de anomalias. Os caminhamentos elétricos foram realizados em diferentes direções, cobrindo a área da dolina (Figura 4).

Os caminhamentos elétricos deste estudo foram realizados através de dois levantamentos sobre o mesmo alinhamento, com o objetivo de melhorar a resolução lateral de ambos. Cada levantamento foi composto por 15 estações de medidas equidistantes (também conhecidos como eletrodos) de 25 metros entre si, totalizando para cada linhas o comprimento superficial de 375 metros. Posteriormente aos levantamentos e integração dos levantamentos, o comprimento superficial total foi de 378,5 metros.

Os caminhamentos elétricos das Linhas 01, 03, 04 e 05 possuem direção aproximada S-SO para N-NE. Todas as linhas foram compostas de dois levantamentos sobre o mesmo alinhamento com o objetivo de melhorar a resolução lateral geral. Os alinhamentos tiveram início na porção S-SO. Os caminhamentos elétricos da Linha 2, por sua vez, tiveram direção de O-NO para L-SE. O alinhamento teve início na porção O-NO. A disposição das linhas em campo pode ser vista na Figura 4.

Figura 4. Vista aérea da área do estudo



Os pontos de coordenadas que identificam o início e o fim das linhas (L1, L2, L3, L4 e L5) podem ser observados a seguir:

Coordenadas para localização da linha L1:

- Inicial (UTM; WGS84; 23K; 652611.40 m E 8209279.71 m S);
- Final (UTM; WGS84; 23K; 652774.54 m E 8209629.12 m S).

Coordenadas para localização da linha L2:

- Inicial (UTM; WGS84; 23K; 652578.16 m E 8209527.24 m S);
- Final (UTM; WGS84; 23K; 652929.56 m E 8209381.62 m S).

Coordenadas para localização da linha L3:

- Inicial (UTM; WGS84; 23K; 652584.82 m E 8209301.69 m S);
- Final (UTM; WGS84; 23K; 652745.33 m E 8209642.49 m S).

Coordenadas para localização da linha L4:

- Inicial (UTM; WGS84; 23K; 652650.36 m E 8209254.32 m S);
- Final (UTM; WGS84; 23K; 652803.00 m E 8209595.00 m S).

Coordenadas para localização da linha L5:

- Inicial (UTM; WGS84; 23K; 652687.00 m E 8209235.00 m S);
- Final (UTM; WGS84; 23K; 652833.44 m E 8209581.90 m S).

2.4 INVERSÃO DOS DADOS GEOFÍSICOS

A inversão de dados geofísicos é uma arte versada no assentamento de um modelo bidimensional (2-D) de resistividade tendo como partida os dados colhidos nos levantamentos elétricos em campo. Neste trabalho, para realizar a inversão dos dados dos caminhamentos elétricos foi utilizado o programa RES 2D INV (Geotomo *Software*, 2003).

A modelagem 2-D utilizada no *software* da Geotomo porciona a subsuperfície em um número de polígonos retangulares, sendo o arranjo desses polígonos definido de acordo com a distribuição dos eletrodos para a coleta de dados que originou a pseudo-seção. O *software* então determina a resistividade aparente dos polígonos ajustando as medidas realizadas.

Os procedimentos para realizar a inversão se utilizam de uma técnica otimizatória que recebe a denominação de “*smoothness-constrained least-squares*”. Com o intuito de reduzir a diferença entre os valores encontrados para a resistividade aparente, mensurados e aferidos no trabalho de campo, desta feita ajustando a resistividade aos polígonos gerados no programa. (GANDOLFO, 2007).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A interpretação considerou a litologia local, com uma camada superficial de cobertura sedimentar seguida por rocha calcária, evidenciada por afloramentos na área da dolina e do sumidouro. A Figura 5a mostra a exumação de rocha calcárea, na parte central da dolina, com sinais claros de foi esculpida (descontinuidades) pela presença de água. A presença de tal rocha fortalece a análise prévia da geologia local. Já na Figura 5b, no ponto mais profundo da dolina, foi identificado um sumidouro, onde não foi possível mensurar a profundidade da cavidade.

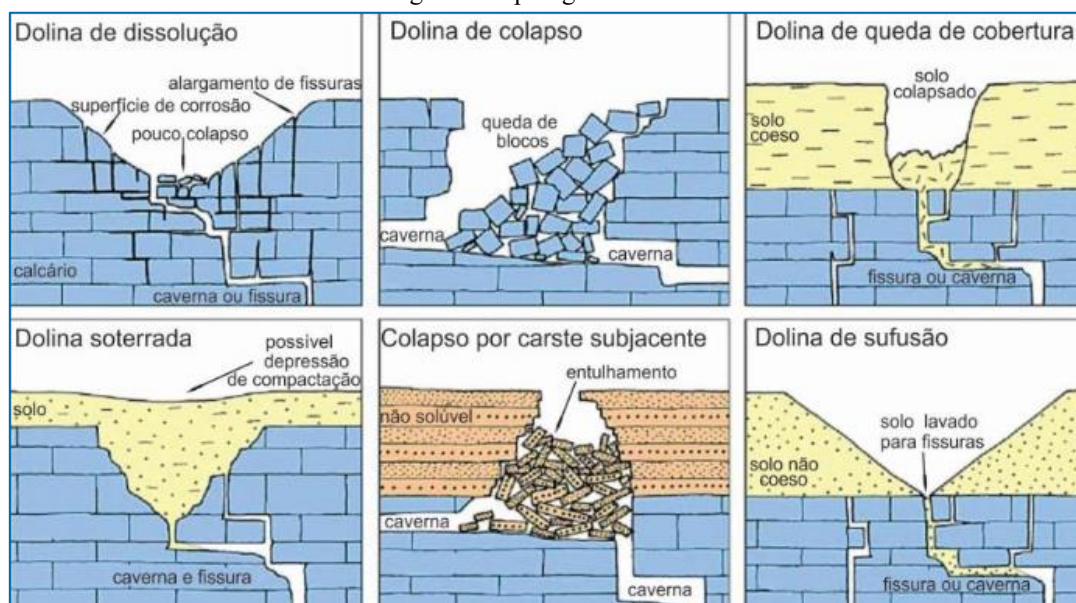
Figura 5. Afloramentos de calcário no local do estudo.



Legenda: (a) Rochas calcáreas encontradas na área central da dolina e em (b) o olho de um sumidouro no ponto mais baixo da dolina.

Após a análise da Figura 5, somada à classificação tipológica proposta por Waltham e Fookes (2005) a dolina analisada pode ser classificada com o uma dolina de dissolução, como pode ser visto na Figura 6.

Figura 6. Tipologia de dolinas

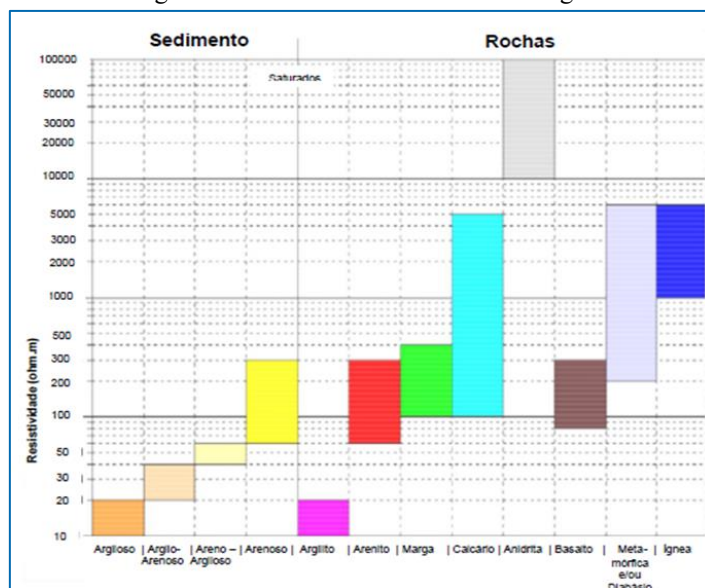


Fonte: Adaptado de Waltham e Fookes (2005).

Após o processamento e modelagem, os dados de eletrorresistividade foram apresentados como seções verticais de resistividade e profundidade, com legenda colorimétrica. Os resultados das interpretações foram associados para formulação de uma interpretação conjunta das condições geoeletricas do ambiente cárstico no local do estudo.

Segundo Braga (2007), os calcários podem variar sua resistividade entre 100 e 5.000ohm.m (Figura 7). Neste trabalho, apesar de não ter sido realizada medida direta da resistividade elétrica do tipo de calcário presente nos afloramentos, os resultados das modelagens dos dados e a sua interpretação indica que calcários muito alterados estão associados com baixas resistividades ($< \sim 550\text{ohm.m}$) enquanto os calcários mais preservados correspondem às resistividades acima deste valor ($> 550\text{ohm.m}$).

Figura 7. Faixas de Resistividade/Litologia



Fonte: Braga (2007).

Portanto, foi considerado na interpretação as regiões das seções com resistividade menores do que 550ohm.m como áreas de ocorrência de calcários alterados e/ou muito fraturados, podendo haver preenchimento destes espaços por sedimentos carregados pelo fluxo hídrico e podendo então estarem saturados, ou até mesmo considerar que estes espaços possam estar preenchidos por água. Só sendo possível afirmar com coeficiente de exatidão através de sondagem direta.

Reiterando, os valores de resistividade encontrados nos caminhamentos, que serão apresentados na sequência deste relatório, são absolutamente harmônicos com aqueles estabelecidos como limites de variação estabelecidos por Luiz; Silva (1995), Borges (2007) e Braga (2007), para os materiais litológicos encontrados na geologia regional.

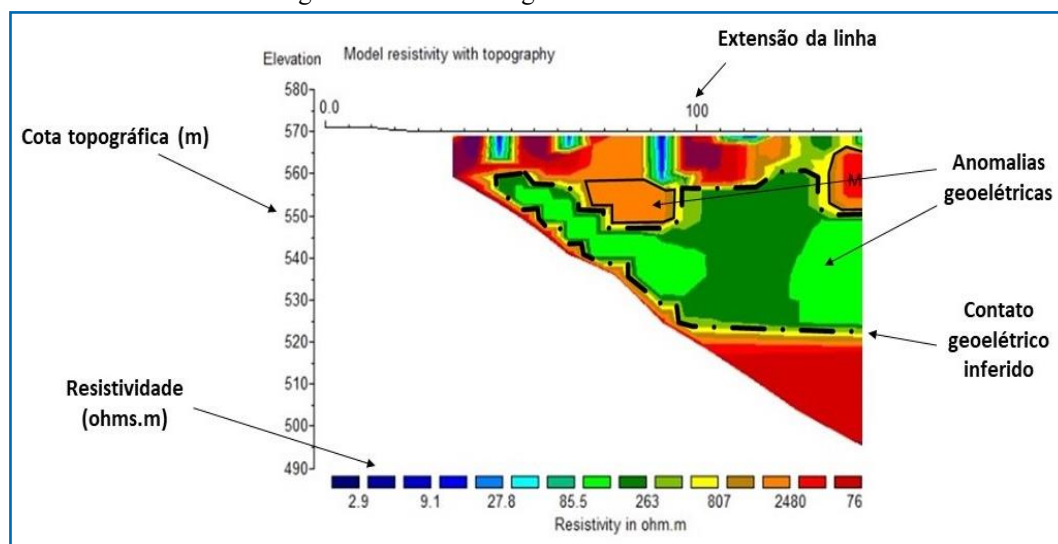
De acordo com os critérios para valores de resistividade utilizados pelos autores citados anteriormente e por referências já citadas neste trabalho, algumas anomalias condutoras, onde o padrão de resistividade local no modelo possui valores baixos quando comparado ao seu entorno. Desta forma, ao comparar tais valores com a média do substrato em questão – definido neste trabalho como calcário alterado – pode-se levantar a possibilidade de tais pontos serem associados a

falhamentos ou bolsões de dissolução da rocha calcária. Sendo válido lembrar que, as rochas calcárias são formadas principalmente pela calcita (carbonato de cálcio, CaCO_3), mineral este com predomínio de se dissolver quando entra em contato com a água acidulada (Neves & Piló, 2008).

De forma geral, os primeiros 12,5 metros em profundidade dos levantamentos, foram considerados como sendo um pacote de cobertura sedimentar superficial, pois os dados coletados apenas oferecem arcabouço técnico para análise a partir de tal profundidade, em vista valor do espaçamento utilizado entre os dipolos, mesmo havendo no local, como já citado, alguns afloramentos.

Os gráficos de resistividade juntamente com a interpretação geológica serão apresentados no próximo tópico com as especificações da Figura 8, utilizada como legenda para as análises feitas sobre os gráficos que virão a seguir.

Figura 8. Sistema de legendas utilizada no estudo



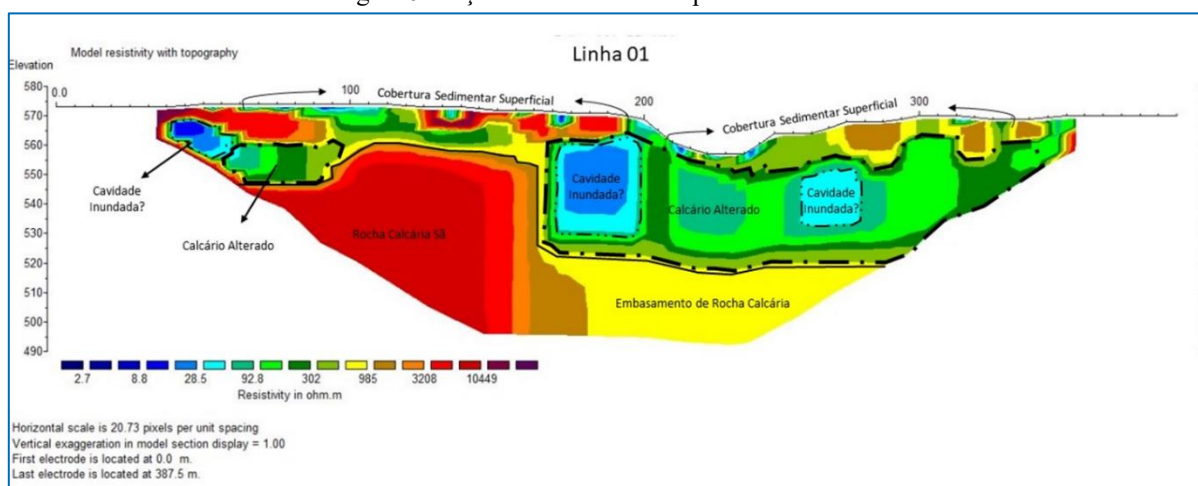
O caminhamento elétrico apresentado na Figura 9, teve extensão de 387,5 metros. A interpretação sugerida indica a presença de uma estrutura geológica no local onde é possível observar a presença da dolina, e uma possível região de avanço começando por volta dos 168 metros até os 200 metros em extensão do caminhamento, pois é uma região de baixa resistividade, considerada como calcário alterado e que se encontra anterior a área onde possivelmente já houve o colapso que originou esta dolina.

Como pode observado a informação mais importante da seção está nas áreas que indicam a existência dos contrastes de resistividade em subsuperfície. Já que o intuito deste trabalho é prospectar e mapear a estrutura da dolina em profundidade. Sendo assim, foi identificada uma grande região possivelmente composta por rocha calcária alterada, iniciando a partir dos 168 metros e se estendendo até o final do caminhamento, e alcançando uma profundidade próxima dos 50 metros.

Deste modo é possível inferir que o local descrito indica fortemente a possibilidade de essa ser a região compreendida pelas mudanças estruturais que ocasionaram a formação da dolina. Os demais valores de resistividade encontrados em outros pontos do CE - 1 são bastante condizentes com aqueles estabelecidos como limites de variação estabelecidos por Luiz; Silva (1995) e Borges (2007), para os materiais litológicos encontrados na geologia da região, sendo estes: calcários e argilas.

Regiões que também merecem destaque neste alinhamento foram definidas como possíveis cavidades subterrâneas inundadas, pelo fato dessas zonas possuírem valores de resistividade anômalos, mais baixos quando comparadas com o seu substrato de entorno. Desse modo essas zonas foram definidas como possíveis cavidades inundadas.

Figura 9. Seção de resistividade aparente do CE – 1



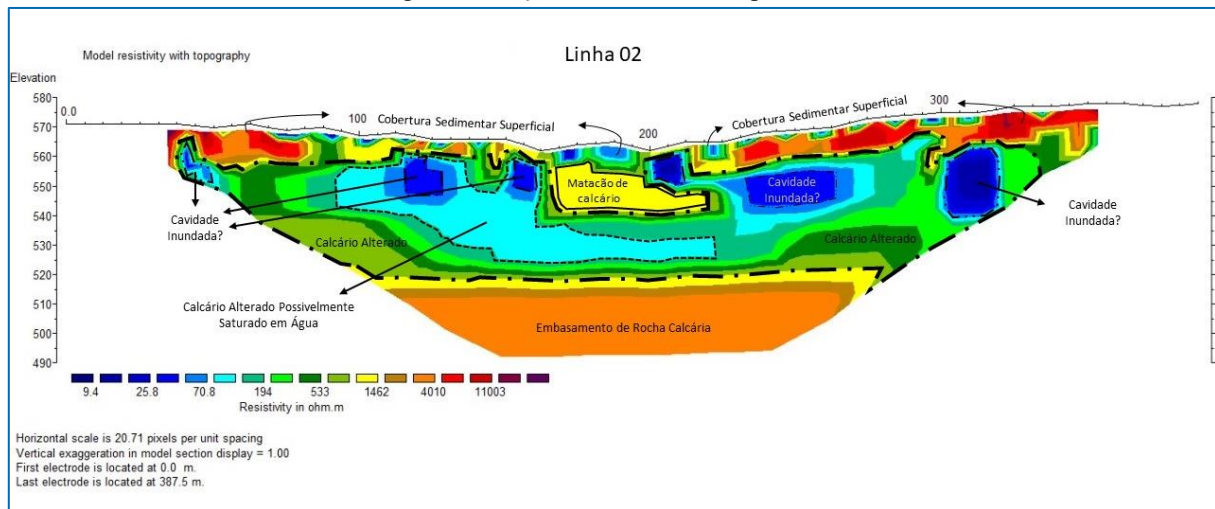
A linha 02, apresentada no gráfico da Figura 10, correspondente ao Caminhamento elétrico 2, o qual foi realizado de forma perpendicular a todos os outros Caminhamentos deste trabalho, mas que foi realizado com as mesmas características citadas anteriormente.

Este alinhamento se assentou exatamente sobre o sumidouro presente ao fundo da dolina. a interpretação da seção do CE – 2 indica a presença de material calcário alterado ao longo de praticamente todo o caminhamento, começando logo após a cobertura sedimentar superficial, esta que possui espessura variável ao longo do alinhamento.

Uma ampla região foi definida como sendo de material calcário possivelmente saturado em água, o que pode ser devido à existência de um grande conjunto de falhas e/ou fraturas na rocha, essa região começa próxima aos 94 metros e se estende até aproximadamente os 218 metros, estando abaixo de um matacão localizado ao centro da linha e destacado no parágrafo a seguir. Foram destacadas neste alinhamento também, mais regiões que igualmente ao CE – 1, podendo ser consideradas como possíveis cavidades inundadas.

Já citado, merece destaque a possível presença de um bloco/matacão de rocha provavelmente pouco alterada próxima ao centro do caminhamento (região em tom de amarelo no gráfico), coincidindo em parte com o local onde se encontra o sumidouro, permitindo caracterizar conceitualmente, as regiões de seu entorno como sendo os locais preferenciais para o fluxo de água que é drenada por esta feição cárstica. Completando a análise do gráfico do CE – 2, o embasamento de rocha sã surge aproximadamente a partir dos 50 metros de profundidade.

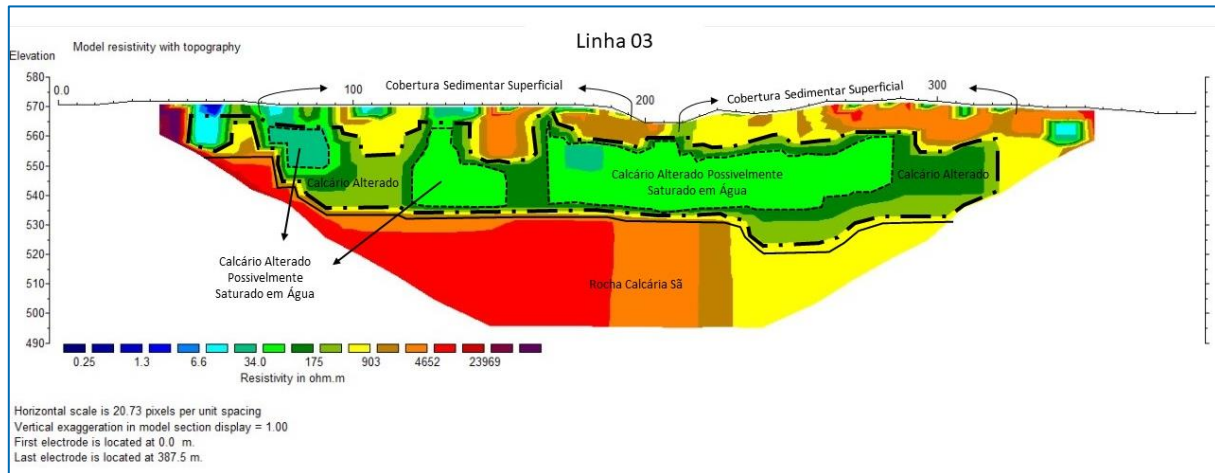
Figura 10. Seção de resistividade aparente do CE – 2



A linha 03 apresentada no gráfico da Figura 11, diz respeito ao Caminhamento Elétrico 3, localizado na extremidade oeste da dolina. Apesar de estar logo ao lado do CE – 1, distando aproximadamente 40 metros um do outro, o CE – 3 não apresentou a mesma característica de existir rocha calcária sã bem próxima a superfície na primeira metade da Linha. Neste caso como pode ser notado na figura a seguir, o embasamento de rocha sã se encontra a partir dos 40 metros de profundidade.

É possível conceituar a existência do mesmo pacote de rocha alterada ao longo de todo o perfil, com caracterização de algumas zonas neste substrato estarem saturadas em água, assim como nos Caminhamento anteriores. Regiões essas, destacadas na análise geológica do gráfico de resistividade.

Figura 11. Seção de resistividade aparente do CE – 3

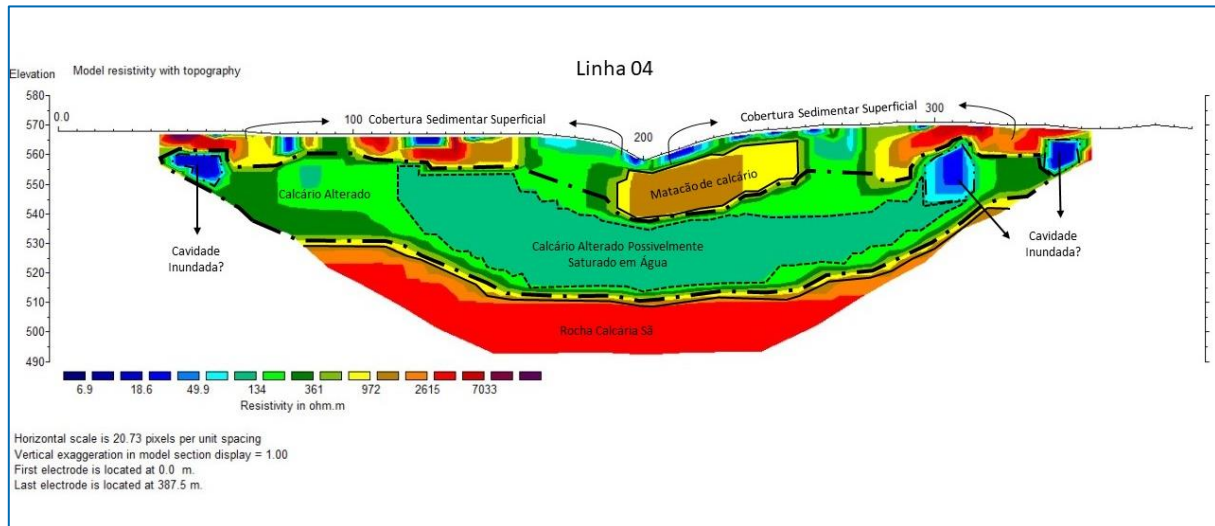


O gráfico da Figura 12, apresenta o resultado da seção de resistividade aparente do Caminhamento Elétrico 4. Um pouco diferente das características apresentadas do CE – 3, o embasamento rochoso, definido como sendo de rocha calcária sã, não segue uma característica de ser retilíneo, ele possui a particularidade de formar uma condição de bacia, tendo nas extremidades uma elevação deste pacote rochoso mais consistente (assim definido por possuir maior valor de resistividade). Estando então mais raso do que na região central do caminhamento que coincide com a área da dolina. Na porção central do Caminhamento o embasamento de rocha calcária sã está a perto dos 60 metros de profundidade.

Acompanhando a mesma dinâmica citada para a rocha sã neste alinhamento, o estrato de rocha alterada também segue as mesmas características de disposição, citadas no parágrafo anterior, isto de forma geral ao longo do perfil. Falando em características recorrentes, no alinhamento correspondente ao CE – 4, foi admissível a definição de sítios que também podem corresponder a áreas de calcário possivelmente saturado, bem como de plausíveis cavidades inundadas, lembrando, isso quando é feita uma análise de contexto geoeletrico.

Um destaque importante neste alinhamento é a possível presença de matacão/bloco de rocha sã em baixa profundidade, a partir dos 200 metros de extensão se estendendo até aproximadamente os 250 metros de distância, em relação ao ponto inicial do Caminhamento.

Figura 12. Seção de resistividade aparente do CE – 4

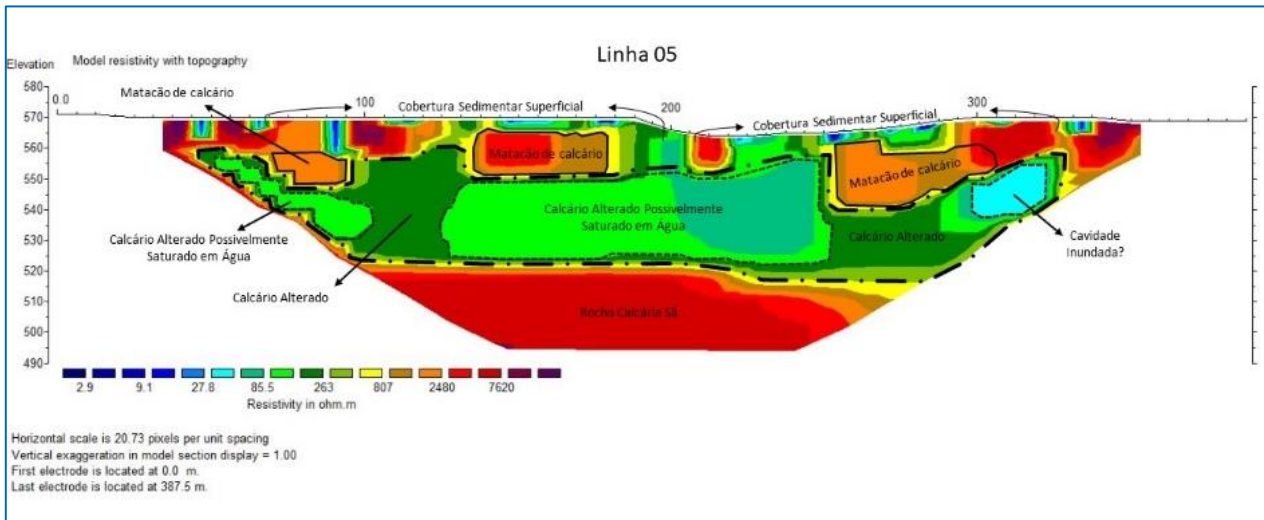


O Caminhamento Elétrico 5 (Figura 13), foi executado na extremidade leste da dolina, nos resultados obtidos para a seção de resistividade do CE – 5, é possível identificar o que o embasamento de rocha calcária sã tem início a aproximadamente 50 metros de profundidade.

Acompanhando a mesma característica presente em todos os outros caminhamentos realizados neste trabalho, é possível caracterizar um estrato de provável rocha calcária alterada em razão das feições cársticas do local, se estendendo ao longo de todo o perfil do caminhamento. Neste alinhamento foi mapeada uma possível região, mais centralizada onde o calcário pode estar saturado em água, devido aos valores de resistividade medidos, e uma anomalia condutiva mais ao final da do gráfico, começando quase aos 300 metros e terminando pertos dos 325 metros, onde é possível a existência de mais uma cavidade saturada em água, como já foi visto por diversas vezes neste estudo.

Foram identificadas e destacadas também no perfil apresentado a seguir algumas porções mais próximas à superfície, que foram delimitadas como sendo possíveis matacões de rocha calcária sã, devido a sua resistividade aparente ter ficado num patamar mediano em relação aos valores apresentados anteriormente para rocha calcária.

Figura 13. Seção de resistividade aparente do CE – 5

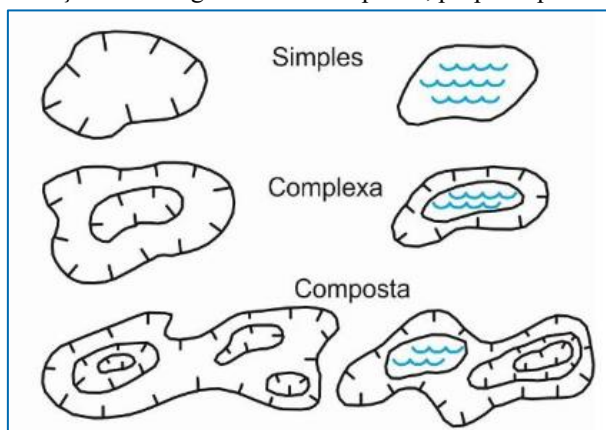


Sobre a análise dos levantamentos em separado é possível já indicar que os levantamentos seguem o mesmo padrão de contrastes, bem como, havendo bastante homogeneidade entre os valores da resistividade aparente dos materiais em cada um dos cinco caminhamentos, indicando as feições estruturais e a litologia já citadas.

Os dados de superfície, analisados indicam uma possível propagação da deformação em direção à porção sul, como é possível concluir ao analisar os dados do CE – 1 região sul, onde os quatro caminhamentos paralelos tiveram origem. Entretanto, os dados geofísicos sugerem que a norte da dolina o substrato calcário possui os mesmos ingredientes que favorecem o desenvolvimento da deformação para o norte. Já que o estrato definido como sendo de rocha calcária alterada se estende basicamente por toda a extensão dos Caminhamentos, logo abaixo da cobertura de sedimentos superficial. Utilizando como referência, Kohler e Castro (2011), no carste, existem processos de dissolução e abatimentos que são produtos da ação das águas sobre a rocha solúvel, fato que o torna um relevo frágil e dinâmico.

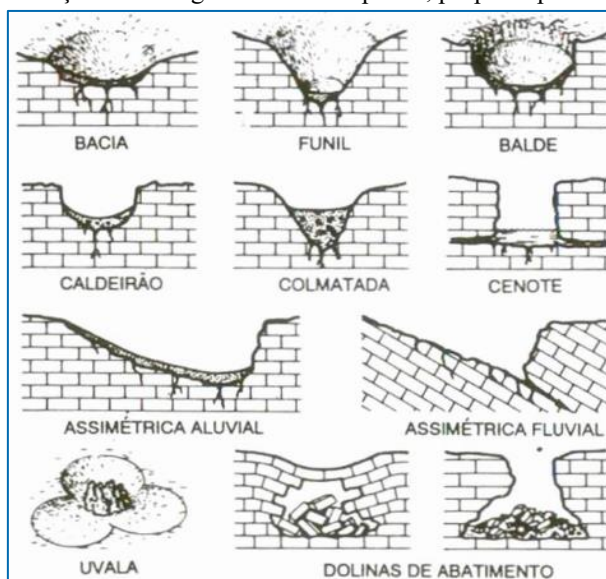
Ao se observar a dolina, somada à imagem aérea apresentada na metodologia deste estudo, é possível classificar a dolina como simples, de acordo com a classificação de Angel e colaboradores (2004), classificação essa que leva em consideração a visão superior (em planta) de uma dolina (Figura 14).

Figura 14. Classificação morfológica em vista superior, proposta por Angel et al. (2004)



No entanto, ao se observar a topografia (cotas), principalmente a depressão nos gráficos das linhas geofísicas (L1 à L5), e analisar de acordo com a classificação proposta adaptada por Kholer (1995), classificou-se a dolina em questão como uma dolina do tipo bacia (Figura 15).

Figura 15. Classificação morfológica em vista superior, proposta por Angel et al. (2004)



4 CONCLUSÃO

Os resultados deste trabalho indicaram que na região em torno da dolina, onde foi realizado o estudo, os dados geofísicos comprovaram a existência de um substrato calcário alterado, provavelmente muito enfraquecido pela presença de zonas de zonas de deformação. Porquanto é possível indicar baseado nas análises geolétricas, que os processos que atuam no desenvolvimento de relevos e feições cársticas, estão presentes na evolução da paisagem e das características em subsuperfície deste terreno.

É evidente que neste local as características litológicas estão intimamente relacionadas pelas feições cársticas existentes no local. Utilizando como referência, Kohler e Castro (2011), no carste, existem processos de dissolução e abatimentos que são produtos da ação das águas sobre a rocha solúvel, fato que o torna um relevo frágil e dinâmico. Baseado nesse apontamento seria de grande valia o aprimoramento e a ampliação dos estudos na área, sendo sugerido sondagem direta, capaz de confirmar os dados dos modelos geoeletricos, bem novos levantamentos indiretos.

REFERÊNCIAS

- ANGEL, J. C.; NELSON, D. O.; PANNO, S. V. *Comparison of a new GIS-based technique and a manual method for determining sinkhole density: An example from Illinois' sinkhole plain. Journal of Cave and Karst Studies*, v.66, n.1, p.9–17, 2004.
- BORGES, Welintom Rodrigues. Caracterização Geofísica de Alvos Rasos com Aplicações no Planejamento Urbano e Meio Ambiente: Estudo sobre o Sítio Controlado IAG/USP. 2007. 271 f. Tese (Doutorado) – Pós-graduação em Geofísica Aplicada, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- BRAGA, José Luiz. Midiatização como processo interacional de referência. In: MÉDOLA, Ana Sílvia; ARAUJO, Denize Correa; BRUNO, Fernanda (Org.). *Imagem, visibilidade e cultura midiática: livro da XV Compós*. Porto Alegre: Sulina, 2007.
- BECK, B. *Soil piping and sinkholes failures*. In: WHITE, W. B.; CULVER, D.C. (Eds.), *Encyclopedia of Caves*. Second Ed. New York: Elsevier, 2012.pp.718-723
- CANATTO, B. F. Geofísica eletrorresistiva aplicada ao monitoramento temporal da percolação de fluidos no interior de estruturas de barragens. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá/MG, 2021.
- CHRISTOFOLETTI, A. *Geomorfologia*. 2 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1980. 188p.
- FRAGOSO, D. G. C. Geologia dos grupos Bambuí, Areado e Mata da Corda na Folha Presidente Olegário (1:100.000), MG: registro deposicional do neoproterozoico ao neocretáceo da Bacia do São Francisco. *Geonomos*, v. 19, n.1, 2011. p. 28-38.
- GANDOLFO, Otávio Coaracy Brasil. Um estudo do imageamento geoeletrico na investigação rasa. 2007. 215 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- GEOTOMO SOFTWARE. 2003. Disponível em [HTTP://www.geotomo.com](http://www.geotomo.com). Acesso em 5 de dezembro de 2020.
- GUIMARÃES E.M. 1997. Estudos de proveniência e diagênese com ênfase na caracterização dos filossilicatos dos Grupos Paranoá e Bambuí, na região de Bezerra-Cabeceiras (GO). Tese de doutorado, Universidade de Brasília, 270 p.
- KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. *Geofísica de exploração*. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos. 2002. 422p.
- KOHLER, H. C. *Geomorfologia Cárstica*. In: GERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Org.). *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. 3ª. ed. Rio de Janeiro: Bertrand, 1995. p. 309-334.
- LUIZ, José; SILVA, Lúcia Maria da e. *Geofísica de Prospecção*. Belém: UFPA/CEJUP, 1995.311p.

NEVES, A. W.; PILÓ, B. L. O Povo de Luzia. Em busca dos primeiros americanos. Editora Globo, São Paulo, 2008. 21-Piló, L.B. Morfologia cárstica e materiais constituintes: dinâmica e evolução da depressão poligonal Macacos-Baú – Carste de Lagoa Santa, MG. Doctoral Thesis, Universidade de São Paulo, Brazil. 1998

OLIVEIRA, C. V. et al. Atributos micromorfológicos de solos do projeto Jaíba, norte de Minas Gerais. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 24, p. 117-128, 2000.

RIOS, L.A. TOMOGRAFIA ELÉTRICA E SUA UTILIZAÇÃO NO ESTUDO DE DESLIZAMENTOS. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Geofísica) - Instituto de Geociências, Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2019.

SILVA, H.M. Sistemas de Informações Geográficas do Aquífero Cárstico da microrregião de Irecê, Bahia: subsídio para a gestão integrada dos recursos hídricos dos rios Verde e Jacaré. 2005.142p.Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia. 2005.

TRAVASSOS, Luiz Eduardo Panisset. Princípios de Carstologia e Geomorfologia Cárstica. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Brasília: ICMBio, 242 p. 2019.

VIEIRA, L. C. et al. A Formação Sete Lagoas em sua área tipo: fácies estratigrafia e sistemas deposicionais. Revista Brasileira de Geociências, v. 37, n. 4, 2007. p. 1-14.

UHLEIN A., Lima O.N.B.de, Fantinel L.M. & Baptista M.C. 2004. Estratigrafia e evolução geológica do Grupo Bambuí, Minas Gerais. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 42, Roteiro Geológico. Excursão 2, C-D Room, Araxá, 33 p.

WALTHAM, A C; FOOKES, P G. *Engineering classification of karst ground conditions. Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers*, v.3, n.1, p.2, 2005.

REVISÃO ACERCA DA UTILIZAÇÃO DE AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS (RPA) NA INDÚSTRIA DA MINERAÇÃO

  10.56238/livrosindi202529-002

Gustavo Barbosa Soares

Bacharel (2024) em Ciência e Tecnologia pela UFVJM, Janaúba, Brasil
E-mail: soares.gustavo@ufvjm.edu.br

Herbert Souza e Silva

Biólogo (2009) pela UNIMONTES, Engenheiro de Minas (2017) pelas Faculdades Integradas Pitágoras
Mestre (2012) em Ciências Biológicas e Especialista (2013) em EAD pela UNIMONTES
Docente Efetivo do curso de Engenharia de Computação da UNIFIPMoc, Montes Claros, Brasil
E-mail: herbert.silva@unifipmoc.edu.br

Jônatas Franco Campos da Mata

Engenheiro de Minas (1994) pela UFMG, Especialista (2012) em Gerenciamento de Projetos pela FGV
Mestre (2016) em Ciência e Tecnologia de Radiações, Minerais e Materiais pelo CDTN
Doutor (2022) em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas pela UFMG
Professor Adjunto do curso de Engenharia de Minas da UFVJM, Janaúba, Brasil
E-mail: jonatas.mata@ufvjm.edu.br

RESUMO

A indústria da mineração é um setor fundamental para o desenvolvimento econômico e industrial, fornecendo matérias-primas essenciais para diversas atividades no planeta. Porém, enfrenta desafios complexos em suas operações, como a necessidade de garantir a segurança dos trabalhadores, otimizar a eficiência operacional e minimizar os impactos ambientais. A utilização de RPAs (*Remotely Piloted Aircraft*) (Aeronaves remotamente pilotadas), tem se mostrado uma solução promissora para enfrentar esses desafios. Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre a utilização de RPAs na indústria da mineração, explorando suas aplicações, vantagens, desafios e perspectivas futuras. Os resultados da pesquisa evidenciam o potencial das RPAs para transformar a mineração, tornando-a mais segura, eficiente e sustentável. Em minas a céu aberto, as RPAs podem ser utilizados de diversas maneiras, como, mapeamento 3D criando mapas de alta qualidade, monitoramento de encostas detectando riscos geotécnicos, gestão de instalações e monitoramento ambiental objetivando reduzir os impactos na natureza e concomitantemente contribuir para o planejamento eficiente das operações. Já em minas subterrâneas, as RPAs devem ser adaptados aos ambientes confinados, para que realize atividades prejudiciais à saúde humana, como, a detecção de gases perigosos, a caracterização geotécnica em lugares desconhecidos e arriscados, também podendo atuar em missões de resgate, aumentando a segurança dos trabalhadores e otimizando as operações. Com os avanços tecnológicos, vem se desenvolvendo cada vez mais modelos de RPAs sofisticados e adaptados às condições desafiadoras da mineração, abrindo novas possibilidades para o uso dessa tecnologia no futuro.

Palavras-chave: RPA, Drone, Mineração, Aplicações, Vantagens.

1 INTRODUÇÃO

A mineração é uma atividade crucial para o desenvolvimento econômico e industrial do mundo. Responsável pela extração de recursos minerais, como ferro, cobre, ouro, carvão além de muitos outros. A mineração fornece os materiais básicos que sustentam a infraestrutura global, desde a construção civil até a fabricação de produtos eletrônicos, energias renováveis, e grande parte das inovações (Furtado e Urias, 2013). Historicamente, a mineração tem sido uma das principais forças do progresso econômico, gerando muitos empregos, impulsionando o crescimento industrial e contribuindo significativamente para o PIB de muitas nações (Nahas, 2014).

A extração mineral fornece à humanidade uma grande quantidade de recursos e materiais essenciais para a manutenção da vida, o conforto e o desenvolvimento das civilizações (Tanno e Sintoni, 2003). E como assegura Scliar (2005, p. 27), “a mineração é uma atividade econômica primária tão necessária quanto a agricultura e a pecuária, porque produz matérias primas essenciais para a sociedade”.

Com o avanço da civilização e a crescente demanda por recursos minerais, a indústria de mineração tem enfrentado desafios significativos nas últimas décadas, sendo a maior delas, a necessidade de melhorar a eficiência operacional, reduzindo os impactos ambientais e garantindo a segurança dos trabalhadores. Estes desafios têm incentivado a adoção de novos estudos, tecnologias e práticas inovadoras que visam tornar as operações sustentáveis e seguras (Haddad, 2009). Avanços em tecnologias como a automação, sensoriamento remoto e as RPAs (*Remotely Piloted Aircraft*) (Aeronaves remotamente pilotadas), estão transformando a maneira como a mineração é feita, oferecendo soluções para monitoramento e mapeamento mais precisos, bem como para a otimização de processos e redução de riscos (Oliveira e lara, 2019).

Segundo Dias (2023), a utilização de RPAs, também conhecido como drones ou Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), tem crescido consideravelmente nos últimos tempos, sendo aplicadas em diversos setores devido à sua versatilidade e eficácia. No ramo da mineração, as RPAs estão causando um impacto significativo ao apresentarem soluções inovadoras para monitoramento, mapeamento, segurança e otimização das operações. A capacidade das RPAs de acessar locais de difícil alcance, coletar dados em tempo real e executar tarefas perigosas sem expor os trabalhadores a riscos os torna uma ferramenta essencial no contexto da mineração.

Para Shahmoradi (2020) o uso de RPAs na indústria mineradora, atualmente, é bastante abrangente, podendo ser dividido principalmente em duas categorias: operações em superfície e operações subterrâneas. Nas minas a céu aberto, as RPAs são amplamente empregados para realizar mapas tridimensionais, monitorar encostas, gerenciar instalações e garantir a segurança. Essas aplicações não apenas aumentam a eficiência operacional, mas também promovem a segurança dos

trabalhadores e a precisão na coleta de dados. Já nas minas subterrâneas, as RPAs são usadas para caracterização geotécnica, detecção de gases nocivos, inspeção de áreas inacessíveis e missões de resgate; fornecendo uma visão detalhada do ambiente subterrâneo sem que haja necessidade da intervenção direta dos trabalhadores.

Desta forma, este estudo tem como objetivo analisar e revisar as aplicações do uso de RPA na indústria de mineração, destacando suas vantagens, desafios e perspectivas futuras para otimizar operações de mineração.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O presente referencial encontra-se dividido em diferentes tópicos, desde a evolução das aeronaves remotamente pilotadas e sua estrutura, bem como os tipos de mineração o qual podem ser utilizados.

2.1 HISTÓRICO E EVOLUÇÃO DAS AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS

Os drones, denominação genérica da língua inglesa, conhecidos em português como Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) ou como será abordado neste estudo, Aeronave Remotamente Pilotada (RPA – aeronave apenas para uso profissional), têm uma história que remonta ao século XIX, com o uso de balões para fins militares e de observação. Contudo, foi a partir do século XX que estes começaram a ganhar mais destaque, principalmente em operações militares (Silva, 2017). Porém, o verdadeiro início é na década de 1908, quando Julius Neubronner criou o “pombo fotográfico”, utilizado para capturar fotografias aéreas (Rezende, 2019). A partir de então, estes equipamentos, vem evoluindo cada vez mais. Na década de 1970 foi criada o primeiro protótipo real de uma aeronave remotamente pilotada, e com a evolução das tecnologias de comunicação e navegação, as VANTs passaram a ser utilizados em diversas áreas da sociedade, trazendo diversos benefícios e melhorias para o mundo (Carneiro e Andrade, 2019)

A partir da década de 2010, o uso de drones ganhou uma variedade de aplicações civis. Inicialmente, eram utilizados principalmente para levantamentos topográficos e mapeamento aéreo, no entanto, suas aplicações expandiram rapidamente para outras áreas, como inspeção de equipamentos, monitoramento ambiental, agricultura, segurança pública e segurança de barragens (Shahmoradi, 2020). Atualmente, os drones ou RPAs representam uma das inovações tecnológicas mais promissoras, oferecendo soluções eficientes e seguras para diversas operações industriais. Seguindo essa tendência, na última década, a sua utilização na mineração, começou a ganhar força, impulsionado pela necessidade de otimizar as operações, reduzir custos e aumentar a segurança dos trabalhadores (Carneiro e Andrade, 2019).

2.2 COMPONENTES DE UM RPA

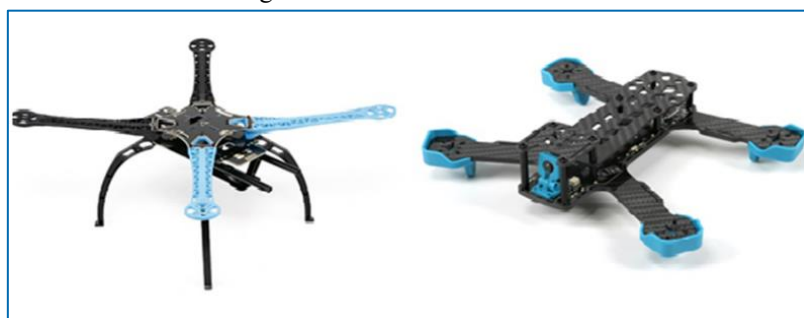
Para entender o funcionamento e as aplicações das RPAs na engenharia de minas, é fundamental conhecer os principais componentes que constituem essas aeronaves. Cada peça desempenha um papel crucial no desempenho das RPAs, desde a geração de empuxo até a captura de dados. A seguir, serão detalhados os principais componentes de RPAs e suas respectivas funções.

2.2.1 Estrutura

A estrutura atua como o esqueleto que sustenta todos os demais elementos do sistema (Figura 1). Ela fornece a base para a fixação dos motores, hélices, sensores, câmeras e demais componentes eletrônicos.

A escolha do material da plataforma central da RPA deve ser rígida para suportar os esforços e manter a estrutura em voo, além de oferecer um local de montagem para os componentes internos (Demolinari, 2016). Materiais como fibra de carbono e plásticos de engenharia são frequentemente utilizados devido à sua alta resistência mecânica e baixo peso (Santos e Lima, 2023).

Figura 1. Estrutura de uma RPA.

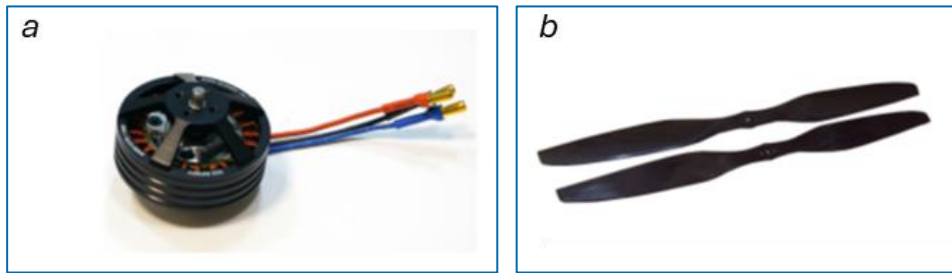


Fonte: Fernandes (2016)

2.2.2 Motores e Hélices

Os motores e hélices são os componentes responsáveis pela propulsão das RPAs, permitindo que se movam pelo ar. Os motores (Figura 2a), convertem energia elétrica em energia mecânica, que é transmitida para as hélices (Figura 2b). As hélices, por sua vez, giram em alta velocidade, gerando o empuxo necessário para levantar e impulsionar a RPA. A eficiência e o desempenho dos motores e hélices são cruciais para garantir um voo estável e seguro, além de otimizar o consumo de energia da bateria (Santos e David, 2019).

Figura 2. Componentes de propulsão.



Legenda: (a) Rotor de aeronave de asas móveis; (b) dupla de hélices. Fonte: Fernandes (2016)

2.2.3 Baterias

A bateria é a fonte de energia que alimenta todos os sistemas da RPA, sendo fundamental para sua autonomia e desempenho (Figura 3). Geralmente, as baterias de íons de lítio são as mais utilizadas devido à sua alta densidade energética e leveza. A capacidade da bateria determina o tempo de voo do equipamento, um fator crucial para missões de longa duração na mineração, como mapeamento de grandes áreas ou inspeções de longa distância (Santos; Lima, 2023).

Figura 3. Baterias utilizadas em RPAs.

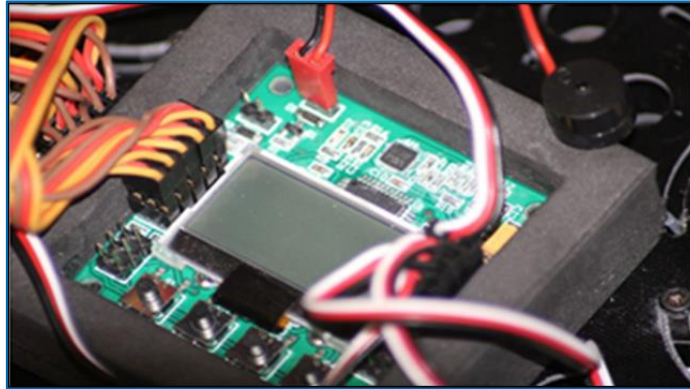


Fonte: Fernandes (2016)

2.2.4 Controlador de voo

O controlador de voo (Figura 4) é o componente central que gerencia e coordena todas as funções do RPA. Ele recebe informações de diversos sensores, como acelerômetros, giroscópios e GPS, e utiliza algoritmos complexos para interpretar esses dados e enviar comandos para os motores e outros atuadores. Também é responsável por manter a estabilidade e o controle da RPA durante o voo, garantindo que ele siga a trajetória desejada e execute as manobras com precisão. Além de gerenciar as funções autônomas da RPA, como o retorno automático ao ponto de partida em caso de perda de sinal ou bateria fraca (Jesus; Simões, 2021).

Figura 4. Controlador de voo.

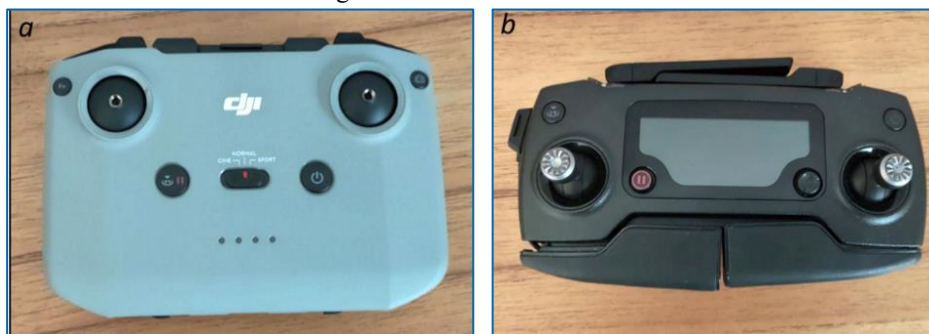


Fonte: Fernandes (2016)

2.2.5 Sistema de Controle Remoto

O sistema de controle remoto (rádio controle), também conhecido como rádio controle como observado na Figura 5, é a interface entre o operador e a RPA, permitindo o controle e a operação à distância. Ele estabelece uma conexão sem fio entre o controle remoto e o receptor na RPA, transmitindo comandos em tempo real para controlar a direção, altitude, velocidade e outras funções da RPA. Este sistema inclui, um transmissor, um receptor, antenas e, em alguns casos, uma tela para visualização das imagens capturadas pela câmera. Os comandos são enviados através de ondas de rádio, que podem operar em diferentes frequências, dependendo do modelo e do alcance do sistema (Santos, 2023; Santos, 2019).

Figura 5. Controlador de voo.



Legenda: (a) Controlador de voo do modelo DJI Mini 2 e em (b) Controlador de voo do modelo DJI Mavic Pro. Fonte: Próprios autores

2.2.6 Sistema de posicionamento global

O Sistema de Posicionamento Global (GPS) é um componente essencial para a navegação e o controle preciso de RPAs (Figura 6). Ele permite que o RPA determine sua localização geográfica com alta precisão, fornecendo informações cruciais para o planejamento de voo, mapeamento aéreo e outras aplicações na mineração. O GPS utiliza sinais de satélites para calcular a posição da RPA em

termos de latitude, longitude e altitude. Essas informações são utilizadas pelo controlador de voo para manter a VANT na rota desejada, realizar manobras precisas e retornar automaticamente ao ponto de partida (Gowda, *et al.*, 2016).

Figura 6. GPS.



Fonte: Fernandes (2016)

2.2.7 Câmera e Gimbal

A câmera e o *gimbal*, como observado na Figura 7, são componentes essenciais para a coleta de dados visuais em RPAs, permitindo a captura de imagens e vídeos aéreos de alta qualidade. A câmera, é responsável por registrar as informações visuais do ambiente, enquanto o *gimbal*, um sistema de estabilização, garante que as imagens sejam nítidas e sem trepidações, eliminando as vibrações transmitidas pela RPA, mesmo em condições de vento ou durante manobras do equipamento (Kim *et al.*, 2016).

Figura 7. Câmera suportada pelo *gimbal*.



Fonte: Kim *et al.* (2016).

2.2.8 Controladores Eletrônicos de Velocidade

Os Controladores Eletrônicos de Velocidade (ESC) são componentes essenciais nas RPAs (Figura 8), atuando como o cérebro que gerencia a rotação dos motores. Eles recebem os sinais do controlador de voo, que por sua vez utiliza informações da Unidade de Medição Inercial (IMU) para determinar a orientação e movimento do RPA, e ajustam a velocidade de cada motor individualmente, permitindo que ele realize manobras precisas, como pairar, subir, descer e girar. Os ESCs são responsáveis por converter a energia da bateria em corrente contínua para os motores, controlando a quantidade de energia fornecida para cada um. Essa regulação precisa da potência permite que a RPA mantenha a estabilidade e o controle durante o voo, mesmo em condições desafiadoras, como ventos fortes ou manobras complexas. A combinação do ESC com a IMU e o controlador de voo forma um sistema integrado que garante a performance e segurança do drone (Madruga, 2018).

Figura 8. Câmera suportada pelo *gimbal*.



Fonte: Casseiro e Pinto (2014).

2.2.9 Sensores Adicionais

Sensores adicionais desempenham um papel de suma importância na coleta dos diversos dados de operações. Sensores de temperatura monitoram as condições térmicas do ambiente. Sensores de umidade medem a quantidade de vapor de água no ar, o que é essencial para prever condições climáticas. Sensores de pressão barométrica fornecem informações sobre a altitude da RPA, permitindo um controle preciso da altura e a geração de mapas topográficos detalhados. Já os sensores de estabilidade, como acelerômetros e giroscópios, são responsáveis por manter a RPA estável e nivelado durante o voo, garantindo a qualidade das imagens e dados coletados, sensores de objetos, para evitar colisões, além de demais outros sensores que podem ser utilizados para uma área específica (Coluccia *et al.*, 2020).

Figura 9. Sensor de distância ultrassônico.

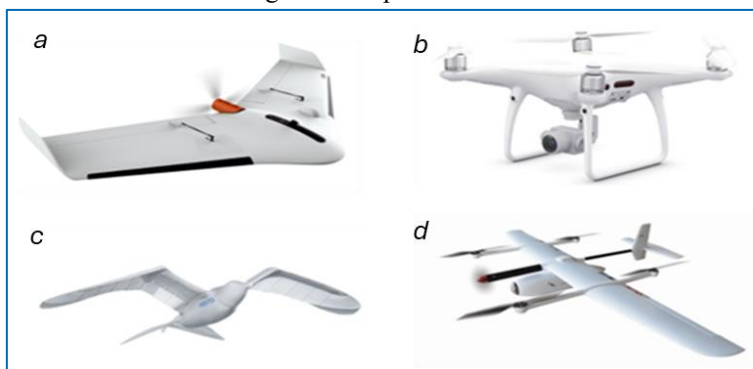


Fonte: Fernandes (2016)

2.3 CLASSIFICAÇÃO E TIPOS DE RPAS

Os RPAs podem ser classificados de acordo com sua estrutura e funcionalidades. As principais categorias incluem. Na Figura 10a, RPA de Asa Fixa, com característica semelhante a aviões, estrutura rígida e asas fixas que proporcionam maior autonomia de voo. São ideais para missões de longo alcance e monitoramento de grandes áreas. Na Figura 10b, RPA de Asa Rotativa que possui hélices que permitem decolagem e pouso vertical, além de maior manobrabilidade. São amplamente utilizados para inspeções detalhadas e mapeamentos precisos em áreas restritas. Na Figura 10c, RPA de asa oscilante, que imita o voo dos pássaros, com asas que batem para gerar sustentação e propulsão, porém é pouco utilizado, por conta da dificuldade no controle de voo. Na Figura 10d, RPA híbrido que combina características de asas fixas e rotativas, oferecendo versatilidade para diferentes tipos de missões (Simões *et al.*, 2022).

Figura 10. Tipos de RPAs.



Fonte: Adaptado de Simões *et al.* (2022)

2.4 SISTEMAS DE ESCAVAÇÃO

Existem dois tipos de sistemas de mineração, nas quais as RPAs são de grande utilidade, mineração de superfície e mineração subterrânea, cada um adaptado ao tipo de depósito mineral e às condições geológicas.

2.4.1 Mineração de Superfície

De acordo com Germani (2002), a mineração a céu aberto (Figura 11), envolve a extração de minérios e outros recursos minerais da superfície da Terra, através da remoção de camadas de solo e rocha. É comumente utilizada para extrair recursos como carvão, ferro, cobre e outros minerais que se encontram em depósitos próximos à superfície. A mineração de superfície é caracterizada por grandes áreas de escavação, o que demanda um planejamento cuidadoso para minimizar os impactos ambientais e garantir a segurança das operações.

Figura 11. Imagem aérea de uma mina a céu aberto

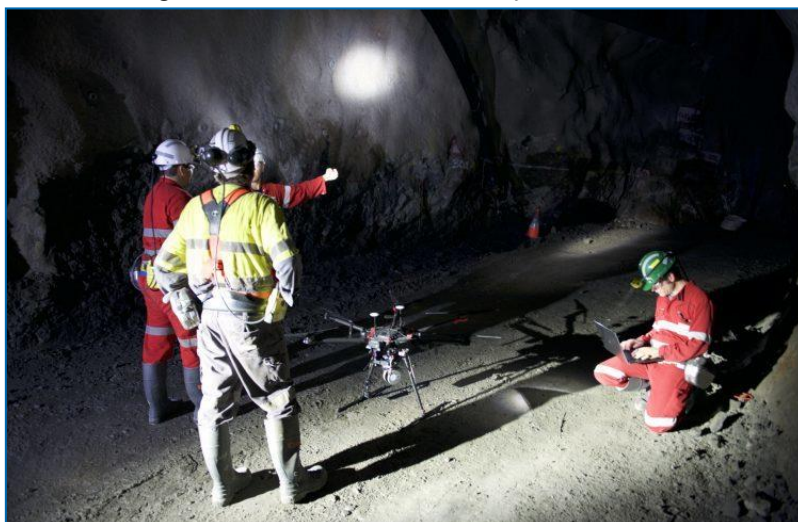


Fonte: Pereira (2021)

2.4.2 Mineração Subterrânea

A mineração subterrânea é utilizada para extrair recursos localizados em profundidades maiores, onde a remoção de grandes quantidades de solo e rocha não é viável (Figura 12). Esse tipo de mineração envolve a criação de túneis, poços e galerias para acessar os depósitos minerais e extrair os recursos. A mineração subterrânea apresenta desafios específicos, como a necessidade de ventilação adequada, iluminação, controle de temperatura e umidade, além de um maior risco de acidentes, como desabamentos e explosões (Carli, 2013).

Figura 12. Foto de RPA em mineração subterrânea



Fonte: DJI (2019)

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa foi desenvolvida a partir de uma revisão da literatura integrativa, de abordagem qualitativa. A pesquisa iniciou pela fase exploratória, que consiste em uma caracterização do problema, do objeto, dos pressupostos, das teorias e do percurso metodológico. Seguido de revisão sistemática da literatura, utilizando artigos científicos, estudos de caso, resumos, trabalhos de conclusão, dissertações, teses e relatórios técnicos relevantes. A pesquisa, por artigos científicos foi realizada em bases de dados renomadas, como *Web of Science*, *Scopus* e *Google Academy*, utilizando os seguintes descritores: "RPA", "VANT", "drone", "mineração", "aplicações", "vantagens" e suas combinações. Além disso, foram consultados órgãos governamentais e fabricantes de equipamentos, buscando informações sobre a implementação e legislação do uso de RPAs.

Na busca nas bases de dados foram utilizados os seguintes critérios de inclusão: a) Artigos que abordaram o uso de RPA ou drones na indústria da mineração, em qualquer etapa do processo produtivo (exploração, lavra, beneficiamento, fechamento de mina); b) trabalhos publicados integralmente e disponibilizados gratuitamente; c) trabalhos publicados no Brasil e exterior; d) trabalhos publicados nos últimos dez anos; e como critérios de exclusão: e) trabalhos que não respondam o problema da pesquisa; f) resumos ou trabalhos incompletos; g) artigos que não estejam disponibilizados na íntegra e gratuitamente, h) textos de caráter não científico.

Inicialmente, com a pesquisa por descritores e suas combinações propostas foi apontado 79 artigos, seguindo o critério de inclusão/exclusão e da leitura dos resumos, o número foi reduzido para 15 artigos. A análise e síntese dos dados foram realizadas após tradução e leitura dos artigos. Após a leitura dos 15 artigos selecionados, os mesmos foram organizados em uma tabulação, sendo que a tabela foi sistematizada tendo como primeiro critério de organização o tema. Nessa mesma tabulação aparecem especificados os nomes dos autores, os títulos dos artigos, bem como o ano de publicação.

As análises dos dados coletados foram predominantemente qualitativas, com base na análise de conteúdo dos artigos e relatórios selecionados. Foram identificados padrões, tendências e insights relevantes sobre o uso de RPAs na mineração, buscando responder às seguintes perguntas de pesquisa:

- Quais são as principais aplicações de drones/RPA na mineração?
- Quais as vantagens e desafios do uso de drones/RPA em operações de mineração?
- Quais as perspectivas futuras para o uso de drones/RPA na indústria da mineração?

Dessa maneira, os materiais selecionados estão apresentados na Tabela 1, a seguir:

Tabela 01. Materiais selecionados

Título	Ano de public.	Autor	Tema
<i>Reviews of unmanned aerial vehicle (drone) technology trends and its applications in the mining industry</i>	2016	Lee, S.;Choi, Y.	Aplicações abrangentes das RPAs na mineração
<i>Applications of Unmanned Aerial Vehicles in Mining from Exploration to Reclamation: A Review. Minerals.</i>	2020	Park, S.;Choi, Y.	
<i>Comprehensive Review of Applications of Drone Technology in the Mining Industry. Drones.</i>	2020	Shahmoradi J. <i>et al.</i>	
<i>Uso Da Aerofotogrametria Como Ferramenta Na Mineração</i>	2020	Pasetto <i>et al.</i>	
<i>The Use of Drones in Mining Operations" Mining Revue</i>	2022	Vangu, G. M.	
Drones na logística: aplicações e versatilidade	2022	Bellini. R. B.	
O uso de drone multirrotor de pequeno porte para diagnóstico e monitoramento de acidentes geológicos	2018	Gramani, <i>et al.</i>	Uso de RPA em aplicações geológicas
Utilização de Drones de pequeno porte como alternativa de baixo custo para realização de levantamentos topográficos	2019	Rezende, F. dos A.	
Mapeamento geológico usando fotogrametria baseada em drones: uma aplicação para exploração de mineralização de Cu do tipo veio	2021	Honarmand; Shahriari.	
Técnicas e Fluxo De Trabalho Para Monitoramento De Movimentação Em Talude Utilizando Imagens De Drone	2022	Ribas, G. <i>et al.</i>	
Determinação De Volumes E Áreas Em Mineração A Céu Aberto Utilizando Drones	2018	Vasconcelos, S. <i>et al.</i>	Aplicações das RPAs na mineração de superfície
Identificação de Processos Erosivos Baseada em Drones em Áreas Restauradas de Mineração a Céu Aberto	2022	Padró J. <i>et al.</i>	

'Avanços e aplicações para drones automatizados em operações de mineração subterrânea'	2019	Jones, E. <i>et al.</i>	Aplicações das RPAs na mineração subterrânea
Panorama Sobre o Uso de Drone Na Mineração Subterrânea	2021	Silva, C. E; Silva, J. M.; Duque, T. R. F.	
Relatório Técnico empreendimento Cerâmica Guaicuí LTDA	2020	Souza-Silva, Herbert	Imagens feitas com RPA

Fonte: Elaborado pelos próprios autores

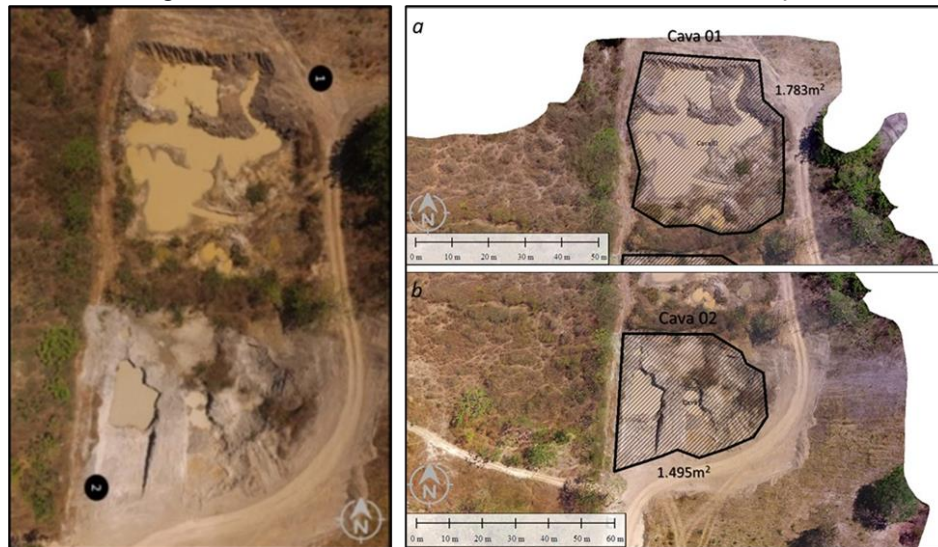
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da pesquisa evidenciaram vantagens significativas na utilização de RPAs na indústria da mineração, Choi e Park (2020) abordam que em minas a céu aberto, as RPAs têm revolucionado a forma como as operações são realizadas, oferecendo benefícios que impulsionam a eficiência, a segurança e a sustentabilidade.

As operações ocorrem primeiramente com a definição da área a ser mapeada, e necessidade de dados a serem coletados, e partir destas escolhas deve ser escolhido o tipo de RPA mais eficaz, seja de asa fixa, de asa rotativa ou híbrido, levando também outros fatores que devem ser levados em consideração, como, o custo do equipamento, a qualidade das imagens capturadas, autonomia de voo, estabilidade do equipamento, e sensores que melhor realizará a captura dos dados necessários (Vasconcelos *et al.*, 2018).

Posteriormente determina-se pontos de controle para auxiliar o RPA no seu voo, a fim de analisar o ambiente e criar rotas de melhor acesso e visualização. Com tudo pronto, ele levanta voo, seja controlado pelo condutor ou automaticamente, seguindo dados de *softwares* e no sistema de hardware interligados a sensores, para executar o voo automático. Com os sensores e equipamentos necessários e apropriados para determinada operação, são realizadas as imagens de voo, para que assim possa ser feita as análises necessárias, como podemos observar na Figura 13.

Figura 13. Ortomosaico realizada com RPA em uma mineração



Fonte: Souza-Silva (2020)

A utilização de sensores e equipamentos auxiliam a captação de dados relevantes na mineração, em RPAs equipados com câmeras de alta resolução, e aceitação de tecnologias inovadoras como o sistema LiDAR (*Light Detection and Ranging*). De acordo com Jones e colaboradores (2019), é possível criar de mapas tridimensionais precisos do terreno, como podemos ver na Figura 14. Esses mapas fornecem informações detalhadas sobre a topografia da mina, o volume de material escavado e a progressão da lavra, facilitando o planejamento e o monitoramento das operações, de maneira mais segura e eficaz, como mencionadas por Vangu (2019).

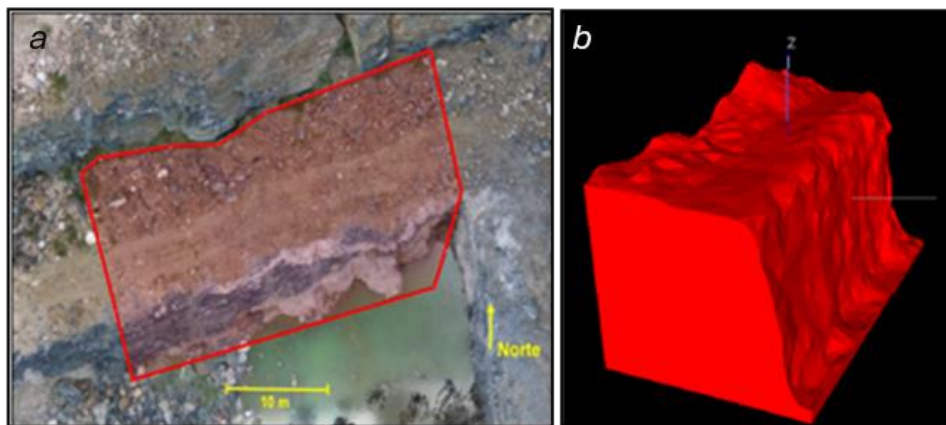
Figura 14. Ortomosaico realizada com RPA em uma mineração



Fonte: Pasetto *et al.* (2020)

O monitoramento de encostas, e levantamentos topográficos são de extrema importância para a eficiência da mineração, e a tecnologia das RPAs pode ser implantada para melhorar as condições do campo de trabalho (Choi e Lee, 2016), proporcionando segurança, que é uma preocupação constante em minas a céu aberto, especialmente em relação à estabilidade de encostas e taludes. As RPAs permitem a inspeção regular dessas áreas, utilizando câmeras de alta resolução e sensores térmicos, pois é possível analisar bancadas (Figura 15) e calcular seu volume, para identificar possíveis sinais de instabilidade, como rachaduras, deformações e erosão. Segundo Vangu (2019), essa detecção precoce de riscos geotécnicos permite a tomada de medidas preventivas, como a instalação de sistemas de drenagem ou a realização de obras de contenção, evitando acidentes e garantindo a segurança dos trabalhadores e das comunidades próximas.

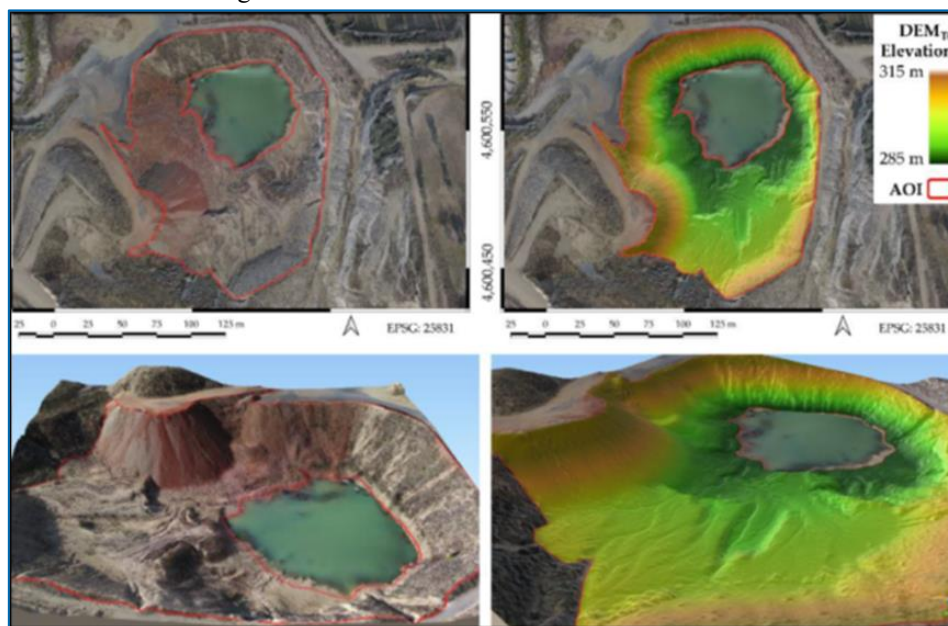
Figura 15. Bancadas processada por *software*



Fonte: Pasetto *et al.* (2020)

A erosão é um dos principais desafios ambientais enfrentados pela indústria da mineração, especialmente em áreas de mineração a céu aberto. O sensoriamento remoto usando imagens adquiridas por RPAs é uma ferramenta muito útil para a caracterização morfométrica de terrenos em atividades de mineração a céu aberto, especialmente para processos de erosão relacionados a áreas restauradas. Os resultados demonstraram a capacidade dos drones em gerar modelos digitais de elevação precisos como vemos na Figura 16, permitindo a identificação de áreas com maior risco de erosão. Com base nessas informações, medidas de recuperação podem ser planejadas e implementadas de forma mais eficiente, contribuindo para a redução dos impactos ambientais da mineração (Padró *et al.*, 2022).

Figura 16. Análise de erosão com auxílio de RPA.

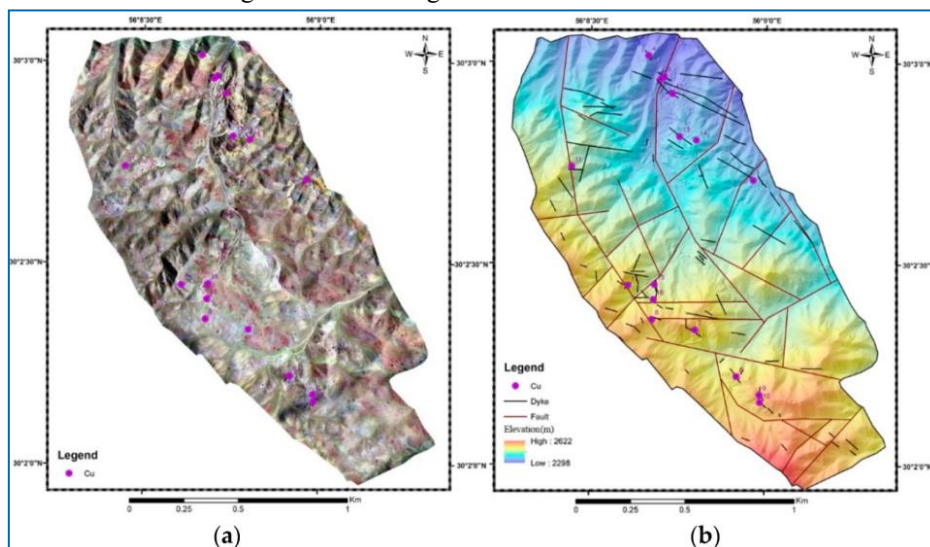


Fonte: Padró *et al.* (2022).

Mapas geológicos são um dos requisitos essenciais em uma exploração mineral, RPAs podem fornecer imagens de alta resolução adequadas para derivar informações geológicas e estruturais de acordo com objetivos de exploração mineral, como pode-se observar na Figura 17. Nesta imagem é apresentada um mapa geológico elaborada a partir de dados coletados por um RPA processado utilizando *softwares* específico. Ele separa com cores os tipos específicos de rocha, com linhas demonstrando seus veios, e pontos demonstrando locais nos quais se encontram minério de cobre. Essa riqueza de detalhes é fundamental para a identificação de alvos de exploração e o planejamento eficiente das operações de lavra (Vasconcelos *et al.*, 2018).

A utilização de RPAs equipados com câmeras de alta resolução permite a coleta de dados de forma rápida, precisa e segura, mesmo em terrenos acidentados. A geração de modelos tridimensionais do terreno e a identificação de estruturas geológicas, como falhas e diques, têm revolucionado o mapeamento geológico na mineração. A agilidade e a precisão dos RPAs possibilitam a criação de mapas em um curto espaço de tempo, otimizando o processo de exploração e reduzindo custos, superando as limitações dos métodos tradicionais em áreas de difícil acesso (Honarmand e Shahriari, 2021).

Figura 17. Ortofotografia de uma área de estudo



Fonte: Honarmand e Shahriari (2021)

O setor de Gestão de Instalações também é bastante beneficiado, as RPAs também têm se mostrado úteis na gestão de instalações de mineração a céu aberto. Com o uso de câmeras e sensores, as RPAs podem realizar o monitoramento de estoques de materiais, segundo Rezende (2019) e reconfirmado por Bellini (2022) como pilhas de minério e estéril, permitindo um controle mais preciso da produção e do armazenamento, podendo também usar essas imagens para cálculos de áreas, como podemos ver na Figura 18, usando como referência seus pontos de controle e processamento das imagens. Além disso, as RPAs podem ser utilizados para verificar a conformidade ambiental das operações, monitorando a qualidade da água, do ar e do solo, e identificando possíveis áreas de contaminação.

Figura 18. Imagem dos pontos de registro de imagem



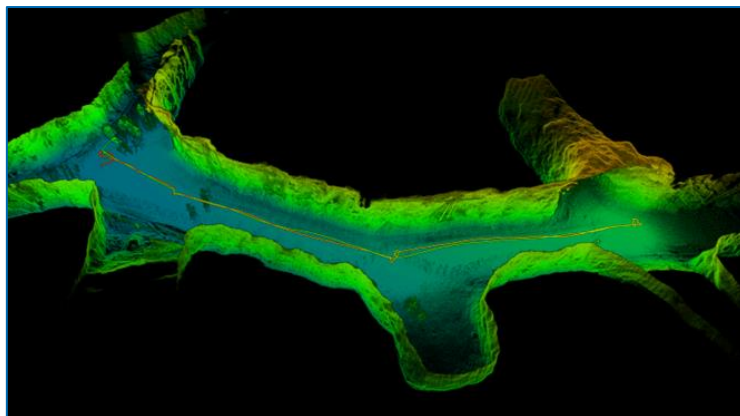
Fonte: Vasconcelos *et al.* (2018)

Como referenciado por Shahmoradi (2020), a mineração subterrânea apresenta um ambiente operacional totalmente diferente e desafiador, devido à falta de luz natural, presença de gases e poeira, e à necessidade de navegação em espaços confinados, os avanços tecnológicos têm permitido o desenvolvimento de RPAs adaptados a essas condições, abrindo um leque de novas possibilidades para otimizar a segurança e a eficiência das operações subterrâneas conforme elencado por Jones e colaboradores (2019).

Uma das possibilidades e vantagens segundo Gramani (2018) e corroborado por Ribas (2022) do RPA na mineração subterrânea é a caracterização geotécnica precisa do ambiente, fundamental para garantir a segurança das operações e o planejamento adequado da lavra. RPAs equipados com sensores LiDAR, podem ser utilizados para mapear descontinuidades, fissuras e outras estruturas geológicas em paredes de túneis e galerias. Esses dados são essenciais para a avaliação da estabilidade das estruturas subterrâneas, a identificação de áreas com risco de desabamento e a definição de medidas de reforço e suporte como pode-se observar na Figura 19.

Em emergências, como desabamentos ou incêndios, as RPAs equipados com câmeras térmicas e outros sensores, podem localizar e auxiliar na evacuação de trabalhadores presos, fornecendo informações em tempo real para as equipes de resgate e agilizando o processo de salvamento.

Figura 19. Imagem de mina subterrânea mapeada através de um RPA



Fonte: DJI (2019)

Outra possibilidade de utilização desta tecnologia das RPAs de acordo com Silva *et al.* (2021), é na detecção de presença de gases tóxicos e inflamáveis, que representa um risco significativo para a segurança dos trabalhadores em minas subterrâneas. RPAs equipados com sensores químicos podem ser utilizados para monitorar a concentração desses gases em tempo real, alertando os trabalhadores sobre os perigos e permitindo a evacuação da área em caso de necessidade. Essa capacidade de detecção remota de gases aumenta a segurança dos trabalhadores e contribui para um ambiente de trabalho mais seguro e saudável.

Em suma, a utilização de RPAs em minas subterrâneas, apesar dos desafios, apresenta um enorme potencial para otimizar as operações, e conforme referenciado por Vangu (2019), aumentar a segurança dos trabalhadores e contribuir para a sustentabilidade da mineração. O desenvolvimento contínuo de tecnologias adaptadas a esse ambiente desafiador promete expandir ainda mais as aplicações dos RPAs na mineração subterrânea, tornando-os ferramentas indispensáveis para o futuro do setor.

Por fim, as RPAs contribuem com vantagens relevantes para a sustentabilidade ambiental da mineração, ao realizarem o monitoramento ambiental de forma mais eficiente precisa, menos custosa e mais segura (Vangu 2019), estes equipamentos podem auxiliar na identificação de impactos ambientais e no desenvolvimento de medidas mitigadoras. Além disso, a utilização pode reduzir a necessidade de deslocamento de equipes e equipamentos, agilizando processos demorados. Em suma, as RPAs têm se mostrado ferramentas valiosas para a indústria da mineração, com aplicações em diversas áreas. A superação dos desafios existentes e o desenvolvimento de novas tecnologias prometem impulsionar ainda mais o uso das RPAs na mineração, como contextualizado por Jones e colaboradores (2019), tornando-os cada vez mais indispensáveis para o futuro do setor.

5 CONCLUSÃO

Esta pesquisa exploratória demonstrou o potencial transformador das RPAs na indústria da mineração. As vantagens identificadas, como o aumento da segurança dos trabalhadores, a melhoria da eficiência operacional, a redução de custos e a contribuição para a sustentabilidade ambiental, evidenciam que as RPAs são ferramentas valiosas para o futuro da mineração.

Em suma, as RPAs representam uma perspectiva promissora para o futuro da mineração, com potencial para revolucionar a forma como as operações são realizadas, tornando-as mais seguras, eficientes, econômicas e sustentáveis. As pesquisas futuras devem se concentrar em aprofundar o conhecimento sobre as aplicações de RPAs em diferentes contextos de mineração, bem como em desenvolver soluções para os desafios existentes, impulsionando a inovação e o progresso nesse setor estratégico para a economia global.

Esta revisão sistemática permitiu uma análise abrangente e aprofundada do tema, fornecendo informações relevantes para a indústria da mineração, pesquisadores e formuladores de políticas públicas. Acredita-se que os resultados desta pesquisa possam contribuir para o avanço do conhecimento sobre o uso de RPA na mineração e para a promoção de práticas mais seguras, eficientes e sustentáveis nesse setor.

REFERÊNCIAS

- BELLINI, R. B. *et al.* **Drones na logística: aplicações e versatilidade**, Trabalho de conclusão de curso (Curso Superior de Tecnologia em Logística) - Faculdade de Tecnologia de Americana "Ministro Ralph Biasi", Americana, 2022, disponível em: https://ric.cps.sp.gov.br/bitstream/123456789/12057/5/_Rafael%20Barbosa%20Bellini_OD1212.pdf. Acesso em 10/07/2024.
- CARLI, C. de. **Análise de projetos limite: lavra a céu aberto x lavra subterrânea**. 2013, Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/77760>. Acesso em 30/06/2024.
- CARNEIRO, M. A.; ANDRADE, E. B. P. **A Utilização de drones na mineração: levantamento aéreo do garimpo aurífero de desemboque (sacramento–mg)**. In: 15ª Semana de Ciência & Tecnologia 2019-CEFET-MG. 2019. Disponível em <https://www.conferencias.cefetmg.br/index.php/15CET/15CET/paper/view/6460>. Acesso em: 10/07/2024.
- CASSEMIRO, G. H. M.; PINTO, H. B. **Composição e processamento de imagens aéreas de alta-resolução obtidas com Drone**. 2014. 80 f., il. Monografia (Bacharelado em Engenharia Eletrônica) - Universidade de Brasília, Brasília, 2014. Disponível em <https://bdm.unb.br/handle/10483/9276>. Acesso em: 30/06/2024
- COLUCCIA, A.; PARISI, G; FASCISTA A. "**Detecção e classificação de drones multirrotores em redes de sensores de radar: uma revisão**" *Sensors* 20, no. 15: 4172, 2020. Disponível em <https://doi.org/10.3390/s20154172>. Acesso em: 26/06/2024
- DEMOLINARI, H. C. **Projeto de Construção um Drone Hexacóptero**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal Fluminense. 2016.
- DIAS, A.R. L. **Mineração 4.0: a evolução e os benefícios da indústria 4.0 no setor de mineração**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023. Disponível em <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/21146/1/DIAS%20A.R.L.pdf>. Acesso em: 26/06/2024.
- DIJ. **Drones mapeiam e inspecionam áreas de mineração para garantir segurança dos mineradores**. 2019. Disponível em <https://www.dji.com/br/newsroom/news/drones-mapeiam-e-inspecionam-reas-de-minera-o-para-garantir-seguran-a-dos-mineradores>. Acesso em: 16/07/2024.
- FERNANDES, F. **Construa um drone do zero**. Disponível em: https://www2.decom.ufop.br/imobilis/como-construir-um-drone-quadricoptero/#google_vignette. 2016. Acesso em: 16/07/2024.
- FURTADO, J.; URIAS, E. **Recursos naturais e desenvolvimento – estudos sobre o potencial dinamizador da mineração na economia brasileira**. São Paulo: Ed. dos Autores/IBRAM, 2013.
- GERMANI, D. J. **A mineração no Brasil**. Relatório Final, Brasil, 2002. Disponível em: <https://maiscursoslivres.com.br/cursos/basico-em-operador-de-trator-e-esteira-apostila03.pdf>. Acesso em: 05/05/2024.

GOWDA, M. *et al.* **Tracking drone orientatio with multiple GPS receivers.** In: *Proceedings of the 22nd anual international conference on mobile computingand networking.* 2016. p. 280-293. Disponível em <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/2973750.2973768>. Acesso em 05/07/2024.

GRAMANI, M. F. *et al.* **O uso de drone multirrotor de pequeno porte para diagnóstico e monitoramento de acidentes geológicos.** In: XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG 2018), 2018.

HADDAD, P. R. **Capitais intangíveis e desenvolvimento regional.** Revista de Economia, ano 33, v. 35, n. 3, p. 119-146, set./dez. 2009.

HONARMAND, M; SHAHRIARI, H. **Mapeamento geológico usando fotogrametria baseada em drones: uma aplicação para exploração de mineralização de Cu do tipo veio.** Minerals 11, no. 6: 585. 2021.

JESUS, F.S.de; SIMOES, M.A.C. **Controladores de voo dirigidos a drones quadricopteros: aferindo o controle de baixo nível em um ambiente simulado,** 2021. Disponível em https://www.researchgate.net/profile/Marco-Simoes2/publication/353293268_Controladores_de_voo_dirigidos_a_drones_quadricopteros_aferindo_o_controle_de_baixo_nivel_em_um_ambiente_simulado/links/63b439b3097c7832ca89613e/Controladores-de-voo-dirigidos-a-drones-quadricopteros-aferindo-o-controle-de-baixo-nivel-em-um-ambiente-simulado.pdf. Acesso em: 09/06/2024.

JONES, E *et al.*, F. **Avanços e aplicações para drones automatizados em operações de mineração subterrânea, em W Joughin (ed.), Deep Mining.** 2019: Anais da Nona Conferência Internacional sobre Mineração Profunda e de Alto Estresse, Instituto Sul-Africano de Mineração e Metalurgia, Joanesburgo, pp. 323-334. Disponível em https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1952_24_Jones. Acesso em: 05/06/2024.

KIM, M.; BYUN, G.; KIM, G.. **Controle de sistema de gimbal para drone para imagem 3D.** *Journal of the KoreaII institute of Informationand Communication Engine ering*, v. 20, n. 11, p. 2107-2112, 2016.

LEE, S; CHOI, Y. **Reviews of unmanned aerial vehicle (drone) technology trends and its applications in the mining industry.** *Geosystem Engineering*. 1-8. 10.1080/12269328, 2016.

MADRUGA, S.P. *et al.* **Projeto de sistema de controle embarcado para controle de voo de quadricópteros.** Dissertação. Universidade Federal da Paraíba. 2018.

NAHAS, M. M. P. **Mineração e dinâmica produtiva: Efeitos da indústria extrativa mineral sobre a estrutura produtiva dos municípios mineradores de Minas Gerais.** Dissertação. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). 2014.

OLIVEIRA, M.G.V; LARA, C.A.S. **O Uso de Drones na Preservação de Reservas Ambientais** vol.04, n°.31, pp.205-208, Curitiba. 2019. Disponível em: <https://revista.unicuritiba.edu.br/index.php/percurso/article/view/3734>. Acesso em 05/06/2024.

PADRÓ, J.*et al.* **Identificação de Processos Erosivos Baseada em Drones em Áreas Restauradas de Mineração a Céu Aberto.** Terreno. 11, no. 2: 212. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/land11020212>. Acesso em: 17/07/2024.

PASETTO, G. *et al.* **Uso Da Aerofotogrametria Como Ferramenta Na Mineração**. Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão, v. 10, n. 2, 2020. Disponível em: https://scholar.google.pt/scholar?hl=pt-BR&as_sdt=0%2C5&q=Uso+Da+Aerofotogrametria+Como+Ferramenta+Na+Minera%C3%A7%C3%A3o&btnG. Acesso em 05/06/2024.

PARK, S.; CHOI, Y. *Applications of Unmanned Aerial Vehicles in Mining from Exploration to Reclamation: A Review*. *Minerals*. 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-163X/10/8/663>. Acesso em: 06/06/2024.

PEREIRA, H. B. S. **Drones na mineração: uma tendência revolucionária**. 2021. Disponível em: <https://blogdaengenharia.com/engenharia/engenharia-de-minas/drones-na-mineracao-uma-tendencia-revolucionaria/>. Acesso em 16/07/2024.

REZENDE, F. dos A. **Utilização de Drones de pequeno porte como alternativa de baixo custo para realização de levantamentos topográficos**. 2019. Disponível em <https://releia.ifsertao-pe.edu.br/jspui/handle/123456789/569>. Acesso em 05/06/2024.

RIBAS, G. *et al.* **Técnicas e Fluxo de Trabalho para Monitoramento de Movimentação em Talude Utilizando Imagens de Drone**. 17º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental. 2022.

SANTOS, L. F. L.; LIMA, C. P. **Projeto de um drone utilizando técnicas de engenharia**. Trabalho de conclusão de curso. Engenharia Mecânica Associação Educacional Dom Bosco. 2023.

SANTOS, D. F. A. **Processo de fabricação de um drone**, 2019. Disponível em: <http://repositorio.unitau.br/jspui/handle/20.500.11874/4598>. Acesso em 05/06/2024.

SCLIAR, C. **Amianto: mineral mágico ou maldito? Ecologia humana e Disputa Política/Econômica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Novatus, 2005.

SHAHMORADI J *et al.* *A Comprehensive Review of Applications of Drone Technology in the Mining Industry*. *Drones*. 2020. 4(3):34. Disponível em <https://doi.org/10.3390/drones4030034>. Acesso em 05/06/2024.

SILVA, L. P. **Tecnologia e guerra: um estudo exploratório acerca das implicações legais do uso de drones em operações militares**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 2017.

SILVA, C. E. da; SILVA, J. M.; DUQUE, T. R. F. **Panorama sobre o uso de drone na mineração subterrânea**. Congresso Técnico-Científico da Engenharia e da Agronomia e 77ª Semana Oficial da Engenharia e da Agronomia. 2021.

SIMÕES, D. P. *et al.* **Métodos de Planejamento de Rotas para RPAs: uma Revisão da Literatura**. *Rev. Bras. Cartogr.*, v. 74, n. 2, 2022. Disponível em <http://dx.doi.org/10.14393/rbcv74n2-60138>. Acesso em 05/06/2024.

SOUZA-SILVA, H. **Relatório Técnico empreendimento Cerâmica Guaicuí LTDA, Processo Nº 48403.832421/2011-57**. Várzea da Palma/MG. 16p. Elaborado pela Mineral Norte Geologia, Engenharia, Saúde e Segurança. 2020.

TANNO, L. C.; SINTONI, A. **Mineração & município**: bases para planejamento e gestão dos recursos minerais. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas. 2003. Disponível em <https://web.eep.br/~phlbiblio/10018744.pdf>. Acesso em 05/06/2024.

VANGU, G. M. *The Use of Drones in Mining Operations*. *Mining Revue*, vol.28, no.3, 2022, pp.73-82. Disponível em: <https://doi.org/10.2478/minrv-2022-0023>. Acesso em: 05/06/2024.

VASCONCELOS, S. *et al.* **Determinação de volumes e áreas em mineração a céu aberto utilizando drones**, Universidade Federal de Pernambuco- UFPE, Recife-PE, 2018. Disponível em https://www.researchgate.net/publication/337951370_determinacao_de_volumes_e_areas_em_mineracao_a_ceu_aberto_utilizando_drones. Acesso em: 05/06/2024.

DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTAÇÃO TRANSMISSORA AUTÔNOMA PIEZOMÉTRICA: SENSORIAMENTO REMOTO PARA BARRAGENS

  10.56238/livrosindi202529-003

Farley Cardoso Fonseca

Engenheiro civil (2023) pelo Centro Universitário FIPMoc, Montes Claros, Brasil
E-mail: fcfonseca1988@gmail.com

Herbert Souza e Silva

Biólogo (2009) pela UNIMONTES, Engenheiro de Minas (2017) pelas Faculdades Integradas Pitágoras
Mestre (2012) em Ciências Biológicas e Especialista (2013) em EAD pela UNIMONTES
Docente Efetivo do curso de Engenharia de Computação da UNIFIPMoc, Montes Claros, Brasil
E-mail: herbert.silva@unifipmoc.edu.br

Luiz Carlos Brant Costa

Engenheiro civil (2023) pelo Centro Universitário FIPMoc, Montes Claros, Brasil
E-mail: luizbrant.lb@gmail.com

Ruy Kennedy Almeida

Engenheiro civil (2023) pelo Centro Universitário FIPMoc, Montes Claros, Brasil
E-mail: ruy-kennedy@hotmail.com

Jônatas Franco Campos da Mata

Engenheiro de Minas (1994) pela UFMG, Especialista (2012) em Gerenciamento de Projetos pela FGV
Mestre (2016) em Ciência e Tecnologia de Radiações, Minerais e Materiais pelo CDTN
Doutor (2022) em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas pela UFMG
Professor Adjunto do curso de Engenharia de Minas da UFVJM, Janaúba, Brasil
E-mail: jonatas.mata@ufvjm.edu.br

RESUMO

A instrumentação geotécnica é um conjunto de recursos de medição ostensivamente empregados na segurança de barragens. Dentre os diversos parâmetros medidos, o nível de pressão total figura como um dos mais críticos e importantes na manutenção dessas estruturas, pois, está intrinsecamente relacionado às anomalias que podem desencadear eventos desastrosos, como um colapso. Este estudo tem como objetivo desenvolver o protótipo de um sistema de sensoriamento remoto para barragens de rejeitos de mineração, através da automação de Piezômetro Casagrande, com o uso de microcontrolador, sensor de distância ultrassônico e transmissor celular. Trata-se de um arranjo elétrico e eletrônico capaz de coletar, processar e transmitir dados de leitura de pressões totais, exercidas em estruturas de barragens. É uma alternativa à instrumentação manual, com mitigação da limitação sensorial humana e o emprego de tecnologia na busca para melhorar processos industriais que colocam em risco a segurança de pessoas, animais, o meio ambiente e a sociedade. Para coleta e análise dos resultados, uma réplica em escala de um Piezômetro Casagrande foi desenvolvida e posteriormente simulada a variação do nível da água. O conjunto do protótipo foi capaz de coletar, processar e transmitir dados de leituras de pressões totais, de forma remota, como proposta, evidenciando um campo de desenvolvimento e aplicação da tecnologia na melhoria de processos.

Palavras-chave: Segurança de barragens, Sensoriamento remoto, Automação, Piezômetro.

1 INTRODUÇÃO

O fim da última década no Brasil foi marcado por dois grandes desastres sociais e ambientais, envolvendo barragens de rejeito de mineração. O colapso, em 2015, da Barragem de Fundão, operada pela Samarco, empresa brasileira fundada em 1977 e atualmente controlada pela Vale S.A. e a empresa anglo-australiana BHP Billiton, no município de Mariana (MG), deixou 19 mortos, além dos impactos sociais e ambientais, com o derramamento de mais de 50 milhões de m³ de rejeitos que atingiram 36 municípios ao longo da bacia do Rio Doce (Lopes, 2016).

Em 2019, a barragem da Mina do Córrego do Feijão, operada pela Vale S.A., também no mesmo estado, rompeu-se, ocasionando 270 mortes e a liberação de mais de 13 milhões de m³ de rejeitos contaminados, que atingiram diretamente 18 municípios na bacia do Rio Paraopeba, além de incalculáveis danos às estruturas e prejuízos material e imaterial. De acordo com Freitas e colaboradores (2022), as atuais tecnologias permitem explorar solos pobres em minério, o que produz um enorme volume de rejeitos. Para cada tonelada de minério de ferro extraída, cerca de 200 toneladas de rejeitos vão parar em uma barragem. Essa prática, que vem sendo empregada em larga escala no território brasileiro, associada a políticas públicas frágeis e fiscalização precária potencializam a iminência de acidentes.

Desastres em barragens de mineração constituem a ponta de um iceberg, materializando e potencializando riscos ambientais e à saúde presentes nos territórios em que são realizadas as atividades econômicas minerárias, bem como inúmeros incidentes e acidentes que ocorrem nelas (Freitas et al., 2022). Um instrumento largamente empregado para o monitoramento desse parâmetro é o Piezômetro Casagrande, cuja operação é uma medida indireta de pressão e que depende da atividade humana em campo, por se tratar de um equipamento manual.

A Agência Nacional de Mineração (ANM), responsável por formular normas e regulamentos que orientam as atividades de mineração no Brasil, incluindo a definição de critérios para a concessão de direitos minerários, os procedimentos para a pesquisa, exploração e lavra de recursos minerais, bem como as regras de segurança e sustentabilidade ambiental obtém relatórios de fiscalização de atividades comerciais, envolvendo exploração de minérios em todo território nacional (ANM, 2022). Segundo a ANM, na data de sua publicação, havia 909 barragens de mineração cadastradas no Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração (SIGBM), das quais 496 estavam enquadradas na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB).

A lei federal 12.334, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens, promulgada em 2010 estabelece a obrigatoriedade de monitoramento de barragens, de acordo com os critérios estabelecidos em seu escopo (Brasil, 2010). Um instrumento largamente empregado para o monitoramento desse parâmetro é o Piezômetro Casagrande, cuja operação é uma medida indireta de

pressão e que depende da atividade humana em campo, por se tratar de um equipamento manual (Moletta *et. al*, 2014).

Atualmente, desenvolvedores trabalham no aperfeiçoamento de tecnologias relativas à automatização de Piezômetro. Uma estação transmissora piezométrica autônoma possibilita uma enorme gama de aplicações, conforme cada realidade além de ser perfeitamente adaptável a qualquer necessidade, especialmente em aplicações onde a disponibilização de energia elétrica ou redes de comunicação são restritas.

Esse estudo tem como objetivo desenvolver o protótipo de um sistema de sensoriamento remoto para monitoramento de pressões totais em estruturas de barragens, com finalidade de auxiliar as atuais tecnologias manuais, como o Piezômetro Casagrande, e contribuir para melhorar a segurança em operações de barragens.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste referencial serão abordados temas voltados para a conceituação do piezômetro casagrande, bem como informações a respeito da automatização e transmissão de informações.

2.1 PIEZÔMETRO CASAGRANDE

O Piezômetro Casagrande é um instrumento de medição indireta de pressão, amplamente empregado em estruturas de barragens. O seu funcionamento baseia-se na lei de Stevin, que afirma que a pressão hidrostática em um ponto de um líquido é igual à pressão atmosférica mais a pressão exercida pelo líquido acima desse ponto (Moletta *et. al*, 2014). Essa relação matemática é demonstrada na Equação (1).

$$P = P_o + d.g.h \quad (1)$$

onde:

P = pressão absoluta ou total; **P_o** = pressão atmosférica;

d = densidade;

g = gravidade no local; e

h = altura da coluna d'água.

Em termos práticos, um Piezômetro consiste em um tubo inserido em um furo de sondagem no local onde se deseja obter o valor de pressão. Para se obter esse valor, a coluna d'água no interior do tubo é medida com auxílio de uma fita métrica. Aplicando-se uma relação matemática sobre o dado obtido, é possível saber o nível de pressão que o fluido está exercendo sobre a estrutura (Medeiros, 2013).

Em obras de engenharia, a instrumentação geotécnica se institui como umas das ferramentas utilizadas para observar, identificar e caracterizar eventuais inconformidades que constituem potenciais riscos à segurança do empreendimento. A partir dos dados coletados em diferentes seções e zonas do local investigado, são feitas análises considerando os valores limites no processo de instrumentação, que facilitam a identificação de prováveis irregularidades (Fonseca, 2003).

2.2 TELEMETRIA E GSM

O sensoriamento remoto é a capacidade tecnológica de se obter informações sobre algo, sem que haja necessariamente a presença humana no local. Esse processo consiste na utilização de sensores para a aquisição de informações sobre objetos ou fenômenos sem que haja contato direto entre eles (Barros & Freitas Junior, 2023). O sensoriamento remoto cresceu consideravelmente desde então, e hoje é uma técnica amplamente utilizada em diversas áreas (Novo, 1989).

A palavra telemetria é a união de duas palavras gregas: tele significa longe e meter significa medir. Por isso telemetria (TM) significa realizar medições à distância, ou em local remoto. A telemetria começou devido a necessidade de realizar medições em locais inacessíveis, como a temperatura dentro de um forno, e evoluiu em uma ciência complexa capaz de realizar medições dentro de um míssil guiado, ou em qualquer lugar remoto (Mattos, 2004).

A telemetria se tornou mais acessível no Brasil após a chegada no país do serviço GSM (*Global System for Mobile Communications*), que é o sistema para comunicação de dispositivos celulares (Peersman et al., 2000). Sobre o GSM opera o GPRS (*General Packet Radio System*), que é um serviço de transmissão de dados, utilizando a rede celular. Esse serviço opera pela comutação de pacotes, onde o canal de rádio só é efetivamente utilizado quando o cliente está enviando ou recebendo dados. Essa técnica permite que vários usuários utilizem o mesmo canal simultaneamente. Esse serviço, em geral, é tarifado pela quantidade de dados trafegados. A chegada dessa tecnologia permitiu a implementação de telemetria em área urbanas e arredores, com menor custo de investimento em redes de comunicação (Dillenburg, 2003).

2.3 VANTAGENS DA AUTOMAÇÃO

Dados coletados, processados, transmitidos e armazenados de forma autônoma possibilitam um aumento significativo na eficácia e na garantia da segurança dessas estruturas. A tecnologia do sensoriamento remoto permite ainda melhorar a resposta em situações em que ações para a preservação da vida sejam necessárias, como por exemplo, gerar alertas para situações críticas de pressões (Campbell, 2007). Atualmente, desenvolvedores trabalham no aperfeiçoamento de tecnologias relativas à automatização de Piezômetro, como o de Cordas Vibrantes, porém, nenhuma

delas permitem o sensoriamento completamente remoto, incluindo áreas sem disponibilização de energia elétrica.

Um sistema automatizado de monitoramento de pressões totais em barragens auxilia na maior parte dos problemas relativos à operação do Piezômetro Casagrande. Dados coletados, processados, transmitidos e armazenados de forma autônoma possibilitam um aumento significativo na eficácia e na garantia da segurança dessas estruturas. A tecnologia do sensoriamento remoto permite ainda melhorar a resposta em situações em que ações para a preservação da vida sejam necessárias, como por exemplo, gerar alertas para situações críticas de pressões.

O ponto central de um sistema de sensoriamento remoto é um computador para o controle e processamento de dados. Para aplicações onde é requerido um baixo custo de investimento por unidade, situação que se aplica à automatização de um Piezômetro, o uso de um microcontrolador torna-se uma opção óbvia.

Microcontrolador, por sua vez, é um computador completo construído em um único circuito integrado. Eles são compostos de uma unidade de processamento central, memória e unidade de entrada e saída integradas a um único microchip (Malvino, 1985). Um microcontrolado é capaz de receber os dados coletados por um sensor, processá-los, gerar novos dados, transmitir ou armazenar, de acordo com a conveniência da aplicação.

3 METODOLOGIA

A Estação Transmissora Autônoma Piezométrica (ETAP) consistiu em um projeto de pesquisa e desenvolvimento de um protótipo para emprego em sensoriamento remoto de estruturas de barragens. A primeira etapa do projeto contemplou o estudo do funcionamento e peculiaridades do instrumento Piezômetro Casagrande para posterior aplicação da tecnologia eletrônica para automação.

Nessa etapa os princípios de funcionamento, conceitos e leis foram avaliados e foram definidas as melhores tecnologias para uso. O desenvolvimento do projeto da ETAP foi realizado utilizando o software Fritzing e gerando um layout que auxiliou a criação da lista de insumos, criada logo após a elaboração do projeto.

De forma geral, o sistema da ETAP baseia-se na leitura de dados, feita por um sensor ultrassônico, instalado no topo do Piezômetro Casagrande, que faz a aferição da altura da coluna d'água. Após a leitura, um microcontrolador recebe esses dados e os converte em um valor de pressão. Assim, um módulo GPRS (Serviço de Rádio de Pacote Geral), método de transferência de dados usado em redes móveis 2G, é responsável por enviar as informações, seja para uma central ou para um dispositivo específico.

Projetos que envolvem confecção de circuitos impressos, normalmente são elaborados utilizando-se *softwares* de simulação, por permitirem planejar com precisão os componentes do *hardware*, antes da fabricação. Para este estudo, a primeira etapa da prototipagem foi a simulação do sistema e posterior confecção da placa de circuito impresso. Para tal fase, foi utilizado o software de simulação de circuitos Proteus.

Após a simulação do circuito, deu-se início a seleção dos componentes eletrônicos e confecção da placa de circuito impresso. A técnica escolhida foi o método de serigrafia térmica com corrosão por percloroeto de sódio, onde o layout produzido no *software* de simulação foi impresso em uma lâmina transparente, por impressora a laser e transferido termicamente para a placa virgem de fenolite.

O método de produção de placas de circuito impresso utilizando-se a termosigrafia, baseia-se em propriedade química do cobre e do percloroeto de ferro. O *layout* gerado cobre a placa virgem nos pontos em que existem as trilhas elétricas e deixa expostas as áreas que não devem conduzir eletricidade. Como o percloroeto de ferro corrói o cobre exposto, a parte da face cobreada da placa de fenolite que está protegida permanece aderida ao fenolite, produzindo, assim, o circuito.

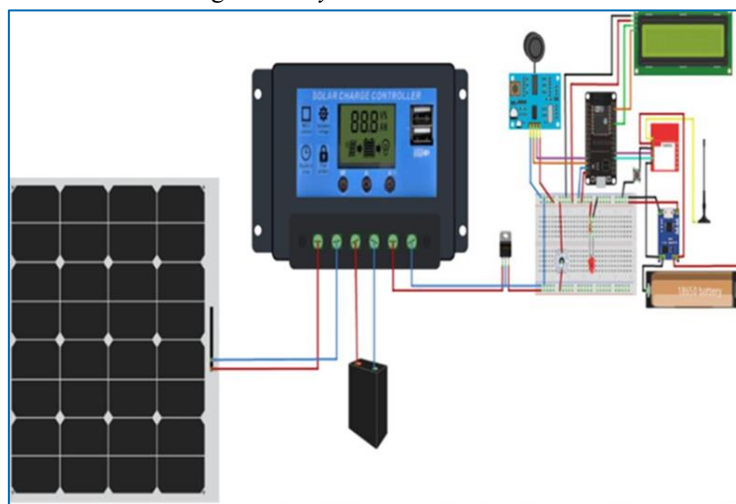
Finalizado o processo de corrosão da placa de fenolite, procedeu-se a perfuração para soldagem dos componentes eletrônicos e estampagem da serigrafia de identificação. Posteriormente deu-se início à etapa de perfuração e estampagem da serigrafia, realizou-se a soldagem dos componentes bornes e terminais e procedeu-se montagem do equipamento.

Para o correto funcionamento do sistema, possibilitando a leitura, processamento e transmissão de dados do Piezômetro Casagrande em escala, o microcontrolador ESP32 recebeu um código de linguagem específica (código aberto), que possibilita a comunicação desse dispositivo com os demais componentes eletrônicos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para alimentar o sistema ETAP, foi desenvolvido um sistema composto por um conjunto de célula fotovoltaica e controlador de carga, com bateria, que possibilita a instalação do sistema em áreas sem disponibilidade de rede elétrica ou rede de comunicação. A Figura 1, traz o *layout* do sistema com os componentes eletrônicos principais, sendo eles: célula fotovoltaica, controlador de carga, bateria chumbo-ácida, regulador de tensão, sensor ultrassônico, microcontrolador ESP32, módulo GPRS com antena, módulo de carregamento de bateria de lítio, bateria de lítio e display LCD 16x2.

Figura 1. *Layout* do sistema ETAP.



Fonte: Elaborado pelos próprios autores

A célula fotovoltaica em conjunto com o controlador de carga e as baterias cumprem a função de possibilitar a instalação desse sistema em áreas sem a disponibilidade de rede de energia elétrica. O módulo GPRS faz a comunicação do sistema com dispositivos móveis, interligados por comunicação via celular. O sensor ultrassônico é o componente responsável por efetuar a leitura da altura de coluna d'água no Piezômetro Casagrande. Por fim, o microcontrolador ESP32 encarga-se de receber e processar os dados de leitura obtidos e transmiti-los através do módulo GPRS.

Após o desenvolvimento do projeto, foi gerada uma tabela com todos os componentes necessários para montagem do protótipo ETAP (Tabela 1).

Tabela 1. Materiais utilizados na montagem do protótipo

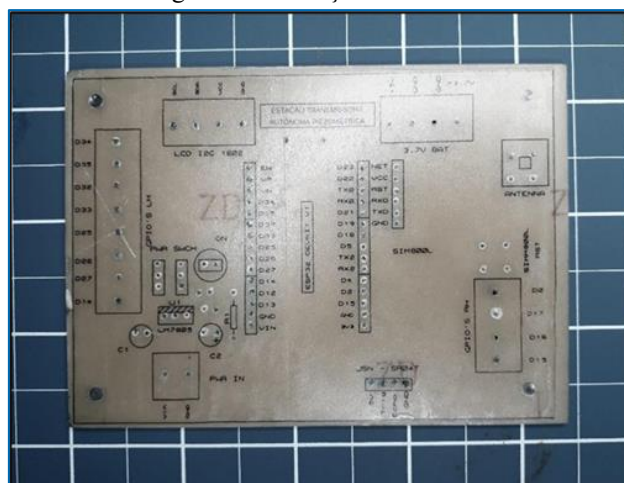
DESCRIÇÃO	QUANTIDADE	UNIDADE
Perfil Estrutural Alumínio 20 x 20 canal 6	2, 20	m
Cantoneira de alumínio 30 x 30 x 15	12	unid.
Parafuso M5 x 12	26	unid.
Porca martelo canal 6	26	unid.
Célula fotovoltaica 30W	1	unid.
Controlador de carga solar modelo W88-A	1	unid.
Caixa termoplástica selada 12 x 18	1	unid.
Cabo flexível 0,75 mm ²	3,5	m
Terminal tubular 0,75 mm ²	14	unid.
Display LCD I2C 16x2	1	unid.
Placa de fenolite 10 x 15	1	unid.
Borne Mini Kf-301 2p 180° P:5.08mm	11	unid.
Barra de pinos soquete universal 40 vias	2	unid.
Regulador de tensão LM7805	1	unid.
Dissipador de alumínio 4 cm	1	unid.
Capacitor eletrolítico 100uF	2	unid.

LED difuso 5 mm	1	unid.
<i>Push button</i>	1	unid.
Resistor 220 ohms ¼ W	1	unid.
ESP-WROOM-32	1	unid.
Módulo <i>GPRS</i> com antena	1	unid.
Sensor ultrassônico AJ-SR04M	1	unid.
Tubo PVC 100 mm ²	0,6	m
<i>MDF</i> 6 mm	0,15	m ²

Fonte: Elaborado pelos próprios autores

Com o auxílio do *software* Proteus, foi desenvolvido a simulação dos circuitos impressos. A Figura 2 mostra o *layout* da simbologia e indicações aplicadas por processo térmico.

Figura 2. Simulação do circuito.



Fonte: Elaborado pelos próprios autores

O funcionamento do circuito em si também pode ser verificado previamente por simulação. Para o sistema ETAP, verificou-se que a melhor escolha, dentro da proposta de inovação, utilizando-se tecnologias de código aberto, a composição ESP32 com módulo GPRS e sensor ultrassônico reúne a capacidade tecnológica para um monitoramento remoto com apurado grau de precisão. Após a realização da simulação do circuito, foram separados os componentes eletrônicos (Figura 3).

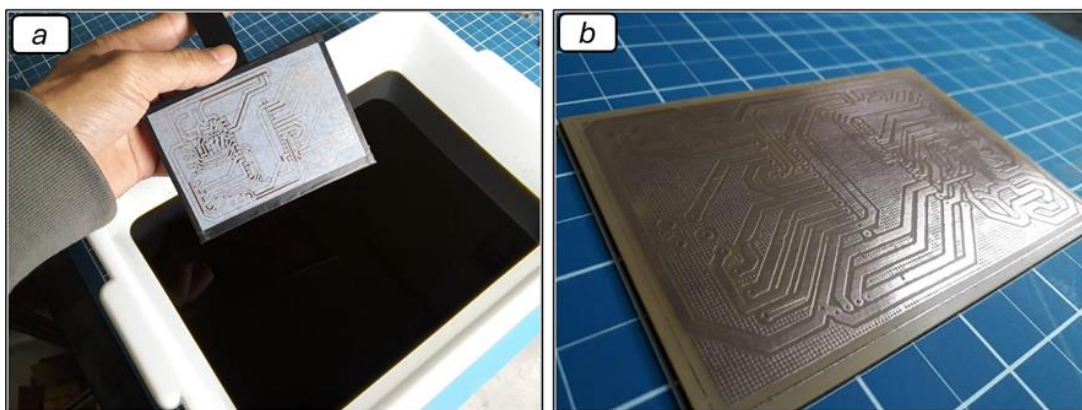
Figura 3. Seleção de componentes.



Fonte: Elaborado pelos próprios autores

Após a simulação e seleção dos componentes, foi confeccionada a placa de circuito impresso. O método utilizado foi o de serigrafia térmica com corrosão por percloroeto de sódio onde o *layout* produzido no *software* de simulação foi impresso em uma lâmina transparente, por impressora a laser e transferido termicamente para a placa virgem de fenolite. A Figura 4a mostra a placa virgem com o *layout*, antes de ser colocada para sofrer o processo de corrosão. Finalizado o processo de corrosão da placa de fenolite, procedeu-se a perfuração para soldagem dos componentes eletrônicos e estampagem da serigrafia de identificação (Figura 4b).

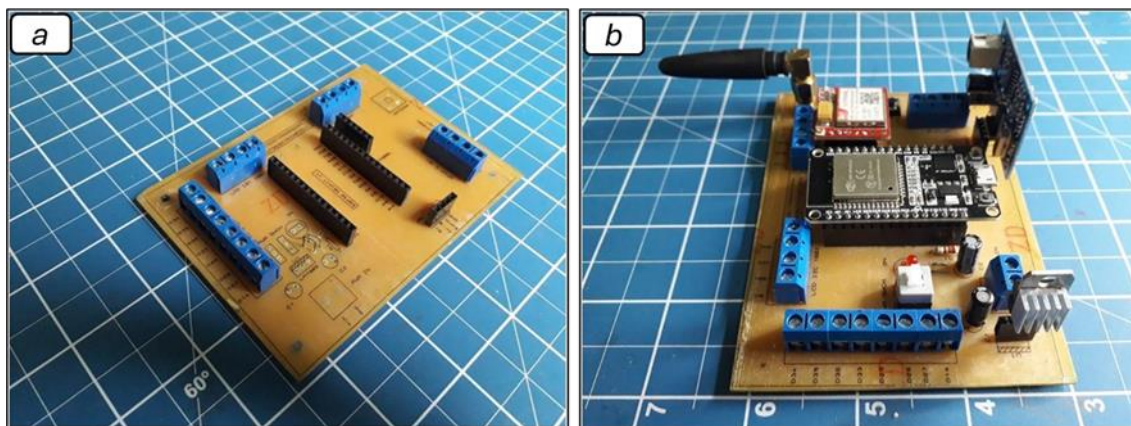
Figura 4. Processo de confecção de circuito impresso.



Fonte: Elaborado pelos próprios autores

Finalizada a etapa de perfuração e estampagem da serigrafia, realizou-se a soldagem dos componentes bornes e terminais, como é possível verificar através da Figura 5a. A Figura 5b traz a montagem dos componentes eletrônicos na placa.

Figura 5. Soldagem de terminais elétricos.



Fonte: Elaborado pelos próprios autores

A montagem do protótipo, combinando o circuito eletrônico com a célula fotovoltaica, baterias, suporte e simulador de Piezômetro Casagrande em escala foi a fase subsequente, mostrada na Figura 6.

Figura 6. Montagem do protótipo ETAP.



Legenda: Equipamento montado, juntamente com a placa solar e o tubo de teste (simulação do piezômetro). Fonte: Elaborado pelos próprios autores.

A programação, essencialmente linguagem C, é demonstrada na íntegra no Apêndice A, ao final desse estudo. Alguns trechos considerados chave para o código são comentados neste resultado, de forma a propiciar melhor entendimento do algoritmo implementado. O primeiro bloco de códigos pode ser visto na Figura 7.

Figura 7. Bloco de códigos 01.

```
#define trig 13
#define echo 12
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2);
```

Fonte: Elaborado pelos próprios autores

Esse bloco do código define quais pinos do ESP32 funcionarão como saídas ou entradas, chama as bibliotecas que cumprem funções específicas e atribuem objetos do *hardware* a objetos do *software*. Na Figura 8 é apresentada a função responsável por gerar o pulso de *trigger*, componente do sensor ultrassônico que emite um pulso sonoro, que refletido, mede a distância até o nível da água.

Figura 8. Linha de códigos 01.

```
void trigPuls();
```

Fonte: Elaborado pelos próprios autores

Variável que armazena o tempo de duração do *echo*, tempo gasto entre a emissão e recepção de um pulso sonoro.

Figura 9. Linha de códigos 02.

```
float pulse;
```

Fonte: Elaborado pelos próprios autores

A variável *inteira dist cm* tem como objetivo armazenar o valor da distância em centímetros.

Figura 10. Linha de códigos 03.

```
int dist_cm;
```

Fonte: Elaborado pelos próprios autores

Instruções que criam variáveis inteiras para armazenamento de outros dados importantes para o funcionamento do código são mostradas na sequência.

Figura 11. Bloco de códigos 02.

```
#define senhaGsm "#ETAP*"
#define pinBotaoCall 26
#define numeroCall "3899999999"
```

Fonte: Elaborado pelos próprios autores

O bloco seguinte da programação define uma senha para acesso remoto, via SMS aos dados lidos pelo sistema ETAP e, também configura um número de celular habilitado para acessar o sistema.

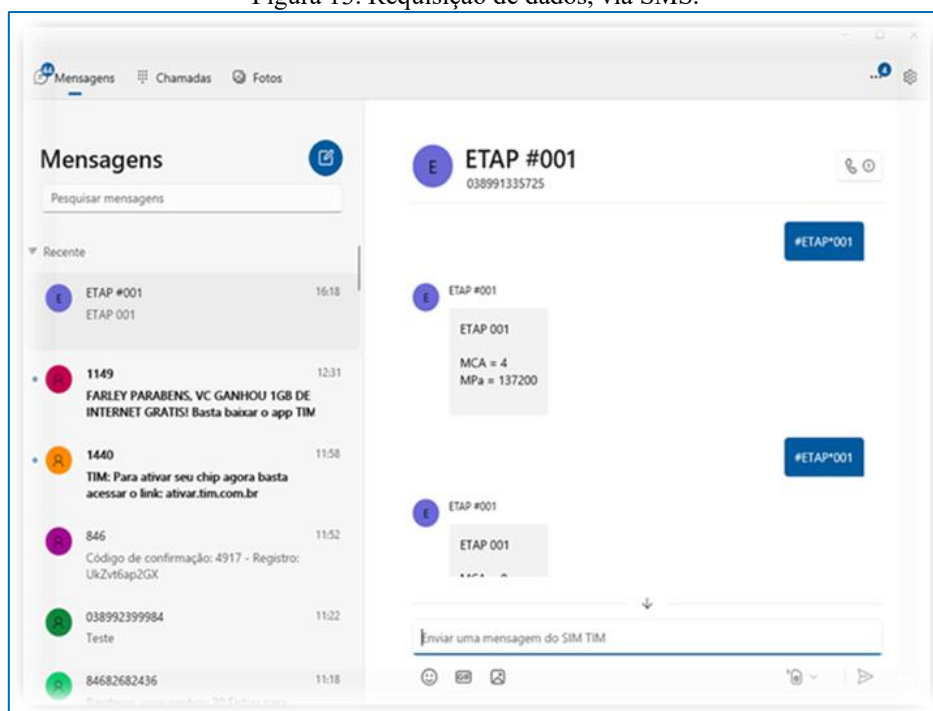
Figura 12. Bloco de códigos 03.

```
#define senhaGsm "#ETAP*"
#define pinBotaoCall 26
#define numeroCall "3899999999"
```

Fonte: Elaborado pelos próprios autores

O protótipo ETAP possibilita duas formas distintas de leituras de dados de pressão, sendo uma in loco, através do display LCD, e a outra pelo envio de um SMS para o número GSM em uso no módulo GPRS, com a senha “#ETAP*” configurada no código. Ao receber e confirmar a validade da senha, o sistema envia o último dado de pressão coletado. A Figura 13 ilustra uma leitura remota, por envio de SMS.

Figura 13. Requisição de dados, via SMS.



Fonte: Elaborado pelos próprios autores.

O bloco *void loop* do código fonte, que significa um código em execução ininterrupta, garante o funcionamento contínuo do sistema. Na prática, o microcontrolador executa continuamente essas instruções, pelo tempo em que o sistema permanecer alimentado eletricamente. O funcionamento se dá pela sequência algorítmica, em que uma instrução está continuamente solicitando ao sensor ultrassônico a realização da leitura de dados. Uma vez recebidas, esses dados são processados e os valores de pressão absoluta ficam disponíveis, tanto no Display LCD quanto para envio remoto. Se recebida um SMS com a senha pré-definida, o microcontrolador executa uma rotina de comunicação com o módulo GPRS e realiza o envio, através deste, dos dados de pressão para o dispositivo solicitante. Em caso de recebimento de uma senha não correspondente, o sistema envia um alerta de senha incorreta.

O modelo ETAP, na forma como foi concebido e colocado em prática foi capaz de funcionar de forma contínua, coletando, processando e armazenando dados de leitura de pressões simuladas no Piezômetro Casagrande em escala. Variando-se a altura do anteparo que representa o nível da coluna d'água, os dados coletados, processados e enviados corresponderam aos dados equivalentes, aplicando-se o princípio de Stevin. O funcionamento contínuo foi garantido pela implementação do sistema de baterias, com autonomia suficientemente capaz de fornecer energia para os períodos de ausência de incidência solar.

Apesar de os testes práticos não terem sido realizados em campo, diretamente em um Piezômetro Casagrande, os resultados qualitativos e quantitativos evidenciaram um potencial de implementação, dada a correlatividade da simulação e da prática, aplicando-se a expressão matemática para obtenção de pressões totais.

Um ponto importante de observação é o fato do microcontrolador ESP32 não ter sido testado continuamente por mais de 72 horas, a fim de verificar seu desempenho em funcionamento contínuo. Durante os testes, esse componente apresentou em algumas situações instabilidade, sendo necessário a realização do reset do sistema.

O microcontrolador utilizado, ESP32, embora tenha se comportado de maneira satisfatória, executando o código fonte, não apresenta robustez construtiva que possibilite o seu emprego em projetos profissionais e em grandes escalas. A sua memória interna, utilizada para o processamento de dados é limitada, o que se torna um impeditivo para o funcionamento sem interrupções. Um sistema temporizador pode ser adicionado ao circuito do protótipo, com a função de forçar reinicializações periódicas do sistema, como formar de limpar sua memória interna.

O módulo GPRS utilizado possui uma antena interna de baixo ganho, que ocasionalmente provoca a perda da comunicação do sistema com os dispositivos de monitoramento. Uma oportunidade de melhoria seria a utilização de uma antena externa com melhor desempenho.

5 CONCLUSÃO

O estudo e desenvolvimento de tecnologias voltadas para a segurança de atividades industriais em geral, e em específico, a mineração sempre será um tema de relevância social, pela capacidade de proporcionar o desenvolvimento de um setor ou setores da economia sem colocar em risco o lado social e ambiental.

Tanto os processos de planejamento, aquisição dos componentes, montagem e programação da Estação Transmissora Autônoma Piezométrica (ETAP) mostrou a capacidade do projeto de realizar medições e transmissão de informações do piezômetro de forma remota através do sistema GSM, permitindo que a leitura seja feita de forma remota, ou seja, sem a necessidade de deslocamento ao local onde está instalado o piezômetro.

Apesar de todos os avanços, pontos como a troca do microcontrolador ESP32 por um microprocessador com maior capacidade de armazenamento e que apresente maior robustez construtiva que possibilite o seu emprego em projetos profissionais e em grandes escalas, além da melhora no sistema de transmissão de dados, com uma possível substituição da antena, por uma antena com maior ganho, podem auxiliar na melhora do sistema.

REFERÊNCIAS

- ANM. **Agência Nacional de Mineração**. Fonte: Agência Nacional de Mineração. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/boletim-de-barragens-de-mineracao>. Acesso em: 10/07/2024.
- BRASIL. LEI FEDERAL 12.334 - **Política Nacional de Segurança de Barragens**. 2010.
- BARROS, P. H. B. de., & FREITAS JUNIOR, A. M. de. **Combinando Inteligência Artificial e imagens de satélite para a previsão de sinistros agrícolas: Uma nota**. 2023. Revista Brasileira de Economia, 77, e012023. Disponível em: <https://doi.org/10.5935/0034-7140.20230001>. Acesso em: 10/07/2024.
- CAMPBELL, James B. *Introduction to Remote Sensing*. 4. ed. London: The Guilfor Press, 2007.
- DILLENBURG, M. R. **Alternativas de aplicação do serviço GPRS da rede celular GSM em telemetria pela Internet**. Novus Produtos Eletrônicos Ltda, p. p.2. 2003.
- FONSECA, A. R. (2003). **Auscultação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica - Estudo de caso de barragens da UHE São Simão**. UFOP, p. p.158.
- FREITAS, C. M., A., S. M., C., M. F., & P., L. Z. **Desastres em barragens de mineração como riscos sistêmicos**. *Revista Brasileira de Epidemiologia*. 2022. Disponível em: <https://www.scielo.org/article/rbepid/2022.v25suppl2/e220004/pt/#>. Acesso em: 09/07/2024.
- LOPES, Luciano, L. M. **O rompimento da barragem de Mariana e seus impactos socioambientais**. Sinapse Múltipla, 5 (1), jun 1-14, 2016.
- MALVINO. **Eletrônica**. São Paulo: Makron Books. 1985.
- MATTOS, A. N. **Telemetria e conceitos relacionados - Uma visão geral dos sistemas de telemetria com ênfase em aplicações aeroespaciais**. São José dos Campos: *Creative Commons*. 2004
- MEDEIROS, Bruno. **Análise por meio de Redes Neurais Artificiais dos dados do monitoramento dos piezômetros da barragem de concreto de Itaipú**. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnia. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 2013.
- MIKHAIL, E., & ACKERMAN, F. (1976). *Observation and Least Squares*. *University Press of America*, p. p.497.
- MOLETTA, Larissa Fernanda Yassugui; DRABESKI, Regiane Gordia; SANTOS, Silvia Helena Fonseca; SILVA, Vania Cristina Rutz da; BRINATTI, André Maurício; SILVA, Silvio Luiz Rutz da; SILVA, Jeremias Borges da. **Abordagem Conceitual Teórica E Experimental Sobre Assuntos de Hidrostática**. Revista Conexão UEPG. Ponta Grossa, volume 10 número 2 - jul./nov. 2014.
- MONICO, J. F., PÓZ, A. P., GALO, M., Santos, M. C., & OLIVEIRA, L. C. **Acurácia e precisão: revendo os conceitos de forma acurada**. Boletim de Ciências Geodésicas, pp. p.469-483. 2009.

NOVO, E. M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações.** São Paulo: Edgard Blucher. 1989.

PEERSMAN, C.; CVETKOVIC, S.; GRIFFITHS, P.; SPEAR, H. *The Global System for Mobile Communications Short Message Service*. IEEE Personal Communications, vol. 7, no. 3, pp. 15-23, June.2000.

APÊNDICE A – CÓDIGO FONTE

```
#define trig 13
#define echo 12
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2);

void trigPuls();

float pulse;
int dist_cm;
int piezo=35;
int mca = 0;
int pe = 0;
int pa = 0;
#include <SoftwareSerial.h>
SoftwareSerial serialGSM(18, 5); // RX, TX
bool temSMS = false;
String telefoneSMS;
String dataHoraSMS;
String mensagemSMS;
String comandoGSM = "";
String ultimoGSM = "";

#define senhaGsm "#ETAP*"
#define pinBotaoCall 26
#define numeroCall "389999999999"

bool callStatus = false;

void leGSM();
void enviaSMS(String telefone, String mensagem);
void fazLigacao(String telefone);
void configuraGSM();

void setup() {
  lcd.init();
  lcd.setBacklight(HIGH);

  pinMode(trig, OUTPUT);
  pinMode(echo, INPUT);
  digitalWrite(trig, LOW);
  Serial.begin(9600);
  serialGSM.begin(9600);

  pinMode(pinBotaoCall, INPUT_PULLUP);
```

```

Serial.println("Sketch Iniciado!");
configuraGSM();
}

void loop() {

trigPulse();

pulse = pulseIn(echo, HIGH, 20000);

dist_cm = pulse/58.82;

Serial.println(dist_cm);
delay(200);
mca = piezo - dist_cm;
pe = 9800*mca;
pa = pe + 98000;
lcd.init();
lcd.setBacklight(HIGH);
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("MCA: ");
lcd.setCursor(8,0);
lcd.print(mca);
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("MPa: ");
lcd.setCursor(6,1);
lcd.print(pa);

leGSM();

if (comandoGSM != "") {
Serial.println(comandoGSM);
ultimoGSM = comandoGSM;
comandoGSM = "";
}
if (temSMS) {

Serial.println("Chegou Mensagem!!");
Serial.println();

Serial.print("Remetente: ");
Serial.println(telefoneSMS);
Serial.println();

Serial.print("Data/Hora: ");
Serial.println(dataHoraSMS);
Serial.println();

Serial.println("Mensagem:");
Serial.println(mensagemSMS);
}
}

```



```

Serial.println();
mensagemSMS.trim();
if ( mensagemSMS == senhaGsm ) {
Serial.println("Enviando SMS de Resposta.");
enviaSMS(telefoneSMS, "MPa: " + pa);
}
temSMS = false;
}

}
void leGSM()
{
static String textoRec = "";
static unsigned long delay1 = 0;
static int count=0;
static unsigned char buffer[64];

if (serialGSM.available()) {

while(serialGSM.available()) {

buffer[count++] = serialGSM.read();
if(count == 64)break;
}
textoRec += (char*)buffer;
delay1 = millis();

for (int i=0; i<count; i++) {
buffer[i]=NULL;
}
count = 0;
}

if ( ((millis() - delay1) > 100) && textoRec != "" ) {

if ( textoRec.substring(2,7) == "+CMT:" ) {
temSMS = true;
}

if (temSMS) {

telefoneSMS = "";
dataHoraSMS = "";
mensagemSMS = "";

byte linha = 0;
byte aspas = 0;
for (int nL=1; nL < textoRec.length(); nL++) {

```

```

if (textoRec.charAt(nL) == '"') {
    aspas++;
    continue;
}

if ( (linha == 1) && (aspas == 1) ) {
    telefoneSMS += textoRec.charAt(nL);
}

if ( (linha == 1) && (aspas == 5) ) {
    dataHoraSMS += textoRec.charAt(nL);
}

if ( linha == 2 ) {
    mensagemSMS += textoRec.charAt(nL);
}

if (textoRec.substring(nL - 1, nL + 1) == "\r\n") {
    linha++;
}
} else {
    comandoGSM = textoRec;
}

textoRec = "";
}

void enviaSMS(String telefone, String mensagem) {
    serialGSM.print("AT+CMGS=\"" + telefone + "\"\n");
    serialGSM.print(mensagem + "\n");
    serialGSM.print((char)26);
}

void fazLigacao(String telefone) {
    serialGSM.println("ATH0\n");
    serialGSM.print((char)26);
    serialGSM.println("ATD " + telefone + ";\n");
    serialGSM.print((char)26);
}

void configuraGSM() {
    serialGSM.print("AT+CMGF=1\n;AT+CNMI=2,2,0,0,0\n;ATX4\n;AT+COLP=1\n");
}

void trigPulse()
{
    digitalWrite(trig, HIGH
    delayMicroseconds(10
    digitalWrite(trig, LOW

```

SISTEMA DE VENTILAÇÃO DE UMA MINA SUBTERRÂNEA E POSSÍVEIS TRATATIVAS

  10.56238/livrosindi202529-004

Daiane Aparecida Nascimento

Bacharel (2019) em Ciência e Tecnologia e Engenheira de Minas (2023) pela UFVJM
Pós-graduanda Lato Sensu em Lavra e Planejamento de Mina na
Universidade Federal de Catalão - UFCAT (2025), Catalão, Brasil
E-mail: daiane.nascimento@ufvjm.edu.br

Gerson Ferreira da Silva

Engenheiro de Minas (2004) e Mestre (2019) em Engenharia de Minas e Petróleo pela UFCG
Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (2023) pela UFRGS
Professor Adjunto do curso de Engenharia de Minas da UFVJM, Janaúba, Brasil
E-mail: gerson.ferreira@ufvjm.edu.br

RESUMO

A liberação de calor é um dos fatores que influenciam nas taxas de produção e na eficiência operacional em uma mina subterrânea. Este trabalho apresenta uma avaliação geral do sistema de ventilação da mineração subterrânea. Os trabalhos realizados tem o objetivo de propor melhorias para a ventilação principal e secundária de uma mina underground no estado da Bahia. Essa melhoria também abrangerá a operação dos exaustores principais da Mina, da Ventilação do R4 Acesso 2, da ventilação do EDeep e da Lavra e desenvolvimento do WRI. A partir do levantamento de dados será realizado os cálculos de vazão como determina a NR e em seguida feita simulações no software Ventsim para ajudar na efetivação do projeto. Essas técnicas foram utilizadas para a construção de um levantamento de dados da distribuição do fluxo de ar, tendo como objetivo a adequação do atual circuito de ventilação a NR-22 e o aumento da quantidade de ar fornecida. Esses dados, correlacionados pelo simulador Ventsim, indicaram valores de vazão e pressão compatíveis aos medidos na mina. Portanto as técnicas computacionais para as análises de redes de fluxo comprovaram ser uma importante ferramenta de projeto quando tratadas junto ao banco de dados no dimensionamento.

Palavras-chave: Ventilação, Vazão, Ventsim, Mina subterrânea.

1 INTRODUÇÃO

Existem duas formas na mineração para lavra de minérios, que podem ser categorizadas em métodos subterrâneos e métodos a céu aberto. A lavra subterrânea é um método de mineração que envolve a extração de minérios ou minerais de depósitos que se encontram abaixo da superfície da terra. Nesse método, túneis, galerias e poços são construídos para acessar as camadas de minério subterrâneo (Macêdo, 2001).

A lavra a céu aberto, por outro lado, é um método de mineração usado para extrair minérios ou minerais que se encontram próximos ou na superfície da terra. Nesse método, grandes áreas de terra são escavadas, e os minérios são removidos das camadas expostas. É uma técnica comum para

a extração de minerais como carvão, minério de ferro, cobre, ouro, entre outros (Hartman; Mutmansky, 2002).

A escolha entre os métodos de lavra subterrânea e a céu aberto depende de vários fatores, tais como: a profundidade e a extensão do depósito mineral, as restrições ambientais, o custo da extração e os requisitos de segurança. Cada método tem suas vantagens e desvantagens, e a seleção adequada é essencial para garantir a sustentabilidade da atividade de mineração (De Carli, 2013).

As operações em minas subterrâneas envolvem principalmente três aspectos essenciais para sua continuidade, que podem ser resumidos da seguinte forma: garantia da estabilidade do maciço rochoso (princípios técnicos que busquem assegurar a estabilidade das escavações de maneira segura e economicamente sustentável); preservação da segurança e do bem-estar ambiental (manutenção da temperatura dentro dos limites estabelecidos pelas normas regulamentadoras); e os gastos envolvidos para a extração (Brasil, 2022).

A ventilação em minas subterrâneas desempenha uma função intrinsecamente conectada e imediata a aspectos de segurança, bem-estar e eficiência, que são avaliados pelo desempenho dos trabalhadores. As condições ambientais abaixo da superfície têm impacto direto na eficácia operacional, e, portanto, o sistema de ventilação implementado deve estar em conformidade com as normas estabelecidas (NR-22/17/15), principalmente aos requisitos de temperatura. Segundo Hartmann (1982) os propósitos de um sistema de ventilação estão associados à provisão adequada de ar para os trabalhadores em termos de quantidade e qualidade, dispersando e neutralizando substâncias tóxicas e explosivas presentes no ambiente subterrâneo, promovendo a remoção eficiente de poeiras e gases, além de controlar a umidade.

Para além do tipo de fonte de energia, há outros elementos significativos que influenciam a temperatura do ar subterrâneo; a exemplo disso, estão as condições climáticas externas, os fatores geológicos específicos da região e o método empregado para a extração mineral (Xiaojie *et al.*, 2011).

É uma situação recorrente em minas subterrâneas que os sistemas de ventilação enfrentem constantes desafios para incorporar demandas inesperadas no projeto original. Isso pode ocorrer devido a diversas razões, como a identificação de novas reservas em profundidade, aumento na produção, implementação de novas regulamentações relativas à exposição dos trabalhadores ou a modificação do método de extração (Hardcastle *et al.*, 1999). Também temos a natureza móvel dos equipamentos de lavra e mudanças de áreas de produção. Além desses, o grau geotérmico e a auto compressão do ar são fatores importantes (Torres; Gama, 2005).

A ventilação está associada a aspectos de segurança e saúde dos trabalhadores que desempenham suas funções no subsolo. Condições inadequadas de temperatura e umidade têm impactos negativos no desempenho dos funcionários, podendo comprometer tanto a segurança quanto

a saúde, aumentando potencialmente o risco de acidentes graves. Garantir a segurança do trabalhador é crucial para o êxito de qualquer operação mineradora, mas também apresenta desafios.

A mineração por inteiro deve seguir as normas da NR (norma regulamentadora) que regem cada demanda. O papel do responsável pela área é a busca de solução de causas ainda não resolvidas, melhorando processos, e potencializando soluções a baixo custo e investimento. Esta pesquisa visar determinar as quantidades de ar requeridas pela mina, conforme metodologia estabelecida pela NR (norma regulamentadora), e posteriormente, a realização de simulações no software Ventsim, com o objetivo de contribuir para a implementação bem-sucedida do projeto.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 VENTILAÇÃO SUBTERRÂNEA

A ventilação em minas subterrâneas visa garantir o suprimento de ar dentro dos limites estabelecidos pelas normas e legislação em vigor, criando condições de trabalho e prevenindo explosões decorrentes da acumulação de gases ou poeira explosiva. Uma mina subterrânea está sujeita a mudanças constantes, como nas frentes de extração e sondagem, e nenhum sistema de ventilação permanece eficaz indefinidamente, tornando necessário o monitoramento e ajustes contínuos para garantir o fornecimento adequado de ventilação (Brasil, 2022).

A necessidade crucial de insuflar ar nas minas subterrâneas remonta ao período entre 4.000 e 1.200 a.C., nas minerações de gipsita no sul da Inglaterra, onde os mineradores utilizavam fogueiras nas escavações para quebrar a resistência mecânica da rocha. Esses mineiros do Neolítico provavelmente não perceberam que essa técnica promovia um fluxo de ar nas galerias. A prática de criar um fluxo de ar no subsolo por meio de fogueiras é mencionada por gregos e romanos, sendo redescoberta na Europa medieval e amplamente utilizada durante a Revolução Industrial na Inglaterra (Mcpherson, 2000).

Com a crescente necessidade de um maior fluxo de ar nas minas, foram desenvolvidas técnicas de ventilação mecânica, utilizando ventiladores instalados no poço de entrada de ar (insuflação) ou na saída da ventilação (exaustão). Esse avanço ocorreu principalmente a partir da segunda metade do século XIX, com o desenvolvimento de ventiladores mecânicos de grandes diâmetros, predominantemente centrífugos e de velocidades reduzidas, acionados por moinhos de vento ou rodas hidráulicas (Anon, 2000).

Posteriormente, ventiladores manuais menores foram empregados para direcionar o gás das frentes de extração para as correntes de ar principais. Portas estrategicamente posicionadas foram incorporadas como parte do sistema de ventilação para guiar o fluxo de ar para áreas específicas. Com a contínua demanda por um maior fluxo de ar nas minas, surgiram técnicas de ventilação mecânica

com ventiladores instalados na entrada de ar (insuflação) ou na saída da ventilação (exaustão). Este desenvolvimento foi notável, especialmente a partir da segunda metade do século XIX, com a introdução de ventiladores mecânicos de grande diâmetro, predominantemente centrífugos e de velocidades reduzidas (Pinto, 2013).

O princípio subjacente ao estudo da ventilação é fornecer ar fresco ao ambiente subterrâneo para atender às necessidades respiratórias humanas, além de manter condições ambientais adequadas para os trabalhadores de maneira eficiente, segura e economicamente viável. Um princípio fundamental é a expulsão de gases tóxicos e prejudiciais da mina por meio do sistema de exaustão de gases. Hartmann (1982) explica que os objetivos de um sistema de ventilação são:

- Prover aos trabalhadores a quantidade e qualidade de ar necessárias;
- Disponibilizar a quantidade adequada de ar para dispersar e neutralizar gases tóxicos e explosivos;
- Redução das concentrações de poeira em suspensão no ambiente laboral;
- Garantir um fluxo de ar com velocidade suficiente para evacuar poeiras e gases da mina;
- Regular a umidade e a temperatura do ar;
- Supervisão do desempenho dos dispositivos térmicos (motores a combustão interna);
- Manter uma temperatura e umidade apropriadas para as atividades humanas;
- Preservar o sistema e realizar operações de maneira consistente e contínua.

2.2 CARACTERISTICA DO AR SUBTERRÂNEO

Costa (2017) destaca que o ar atmosférico, ao percorrer as galerias e frentes de trabalho no interior das minas, sofre uma série de modificações químicas e físicas. Essas alterações resultam em mudanças na composição do ar, geralmente caracterizadas pela diminuição do teor de oxigênio e pelo aumento de anidrido carbônico, nitrogênio e vapor d'água. Além disso, o ar adquire gases tóxicos e explosivos, como monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, gás sulfídrico, dióxido de enxofre, metano, entre outros, além de diversas partículas de poeira.

O termo "ar fresco" refere-se ao ar na mina que é respirável, apresentando uma composição aproximada à do ar atmosférico convencional. Em contrapartida, o "ar contaminado" ou "ar viciado" é inadequado para a respiração, sendo também denominado ar de retorno por ter passado pelas frentes de trabalho.

Para fins de estudos sobre a concentração de gases, a mistura de ar que respiramos é composta, em estado puro e seco (Tabela 1), pelos seguintes elementos:

Tabela 1. Composição média percentual do ar seco

Componente	Conteúdo (% por volume)	Conteúdo (% por peso)
Nitrogênio	78,09	75,55
Oxigênio	20,95	23,13
Argônio e outros gases raros	0,93	1,27
Dióxido de carbono	0,03	0,05

Fonte: Hartmann (1991).

O ar atmosférico invariavelmente contém vapor de água em proporções variáveis, oscilando entre 0,1% e 3,0% em volume. Essa presença de vapor de água não impacta a relação oxigênio-nitrogênio, mas assume uma relevância significativa nas propriedades psicrométricas associadas ao controle da temperatura e umidade. Para fins práticos, o ar é frequentemente considerado composto por 21% de oxigênio, 79% de nitrogênio e outros gases inertes.

Ao adentrar a mina, o ar normal sofre alterações em sua composição; consequentemente, a quantidade de oxigênio diminui, enquanto a quantidade de nitrogênio e dióxido de carbono aumenta. Adicionalmente, são introduzidos diversos gases e partículas em suspensão, resultado das atividades de lavra (Brasil, 2022).

2.3 CONTAMINANTES NO AMBIENTE SUBTERRÂNEO

Para a aeração, fundamenta-se no princípio de introdução de ar respirável, ou seja, aquele que oferece condições adequadas para a saúde humana, e na expulsão do ar com impurezas ou contaminantes. Os contaminantes ambientais são substâncias indesejáveis que, em condições normais, não estão presentes no ar puro. No ambiente de uma mina subterrânea, os contaminantes mais comuns são categorizados como poeira e gases tóxicos.

De acordo com as normas regulamentadoras brasileiras (NR 15 e NR 22), o limite de tolerância de um gás no ambiente confinado de um trabalhador é a concentração máxima em média aritmética suportada pelo trabalhador durante 48 horas semanais de exposição, sendo diagnosticada a insalubridade quando os níveis de gases ultrapassam o limite de tolerância.

Os gases tóxicos constituem contaminantes na atmosfera da mina, e um sistema de ventilação eficiente é crucial para a sua remoção. Geralmente, esses gases originam-se da própria rocha local (geologia) e do desmonte com o uso de explosivos, sendo os principais gases gerados o CO₂, CO e NO_x. O uso de máquinas a diesel, especialmente em relação ao CO e NO_x, também contribui para a presença desses gases (Costa, 2017).

Dentre os gases presentes no ambiente subterrâneo, alguns são particularmente relevantes devido aos efeitos prejudiciais que causam no organismo. A Tabela 2 apresenta os limites de

tolerância dos principais gases em minas subterrâneas, conforme estabelecido pela NR 15 (norma regulamentadora). Os gases metano (CH₄), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x), hidrocarbonetos não oxidados e parcialmente oxidados, amônia (NH₃), gás sulfídrico (H₂S) e dióxido de enxofre (SO₂) são correlacionados com os limites de tolerância em ppm. Mesmo em condições normais, esses gases, em conjunto, representam menos de 0,1% (Vutukuri & Lama, 1986).

Tabela 2. Limites máximos permissíveis para gases

Gases	Limites de tolerância
CO	39 ppm
CO ₂	3900 ppm
NO _x	4 ppm
H ₂ S	8 ppm
SO ₂	4 ppm
NH ₃	20 ppm

Fonte: NR 15 (1978).

A ventilação é uma estratégia para mitigar as concentrações de poeira ambiental, que podem causar problemas de saúde. Caso as medidas de ventilação não se revelem suficientes no ambiente subterrâneo, torna-se necessário empregar outras técnicas conhecidas, como umidificação, utilização de filtros de ar antes das fontes indesejadas, aplicação de água nas galerias para reduzir a geração de partículas e diluição com ventilação secundária (Gancev, 2006).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste estudo foi realizado inicialmente uma ampla revisão bibliográfica, visando pesquisar sobre o sistema de ventilação em mineração subterrânea, e compreender os principais problemas atuais e as técnicas existentes utilizadas para caracterizar a propagação e quantificar o calor dissipado em um ambiente subterrâneo.

Em seguida foram realizadas as atividades de campo. Essas atividades foram direcionadas na busca dos dados preliminares, tais como: as dimensões das galerias, diferença de pressão, circuito de ventilação, taxas de emissão de equipamentos, consumo de combustível, temperatura de bulbo úmido e de bulbo seco, utilização dos equipamentos e suas respectivas potências, condutividade, difusidade térmica e temperatura da rocha virgem.

A etapa seguinte foi o processamento de todas as informações coletadas na mina subterrânea, através da construção de um banco de dados. A partir da elaboração do banco de dados, seguiu-se para os trabalhos de simulação por meio do uso dos softwares VnetPc e VENTSIM para a modelagem do circuito.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 MEDIÇÕES DE VENTILAÇÃO E TEMPERATURA

A Tabela 3 mostra os resultados das medições de ventilação. E os principais dados coletados para cálculo do dimensionamento (locais, data, área das rampas, fluxo de ar e temperatura). A partir desses dados é possível calcular a vazão e temperatura. Percebe-se que na rampa do acesso 2 e na rampa para região mais profunda (EDEEP) a temperatura ultrapassou o limite permitido.

Tabela 3. Medições de ventilação e temperatura na Mina Subterrânea

Local	Data	Área			Medição Ventilação		Medição temperatura (°C)			Temp Efetiva
		Larg	Altura	m²	m/s	m³/s	Seca (%)	Úmida (%)	Relativa (%)	
Rampa acesso 2R4	06/22	6,38	6,41	40,9	0,08	3,45	34,9	30,1	89,5	31,54
Ar chegando no R4 acesso 2 via RV8	06/22	5,20	3,94	20,5	1,75	35,95	33,8	26,7	58,0	28,33
Rampa para EDEEP	06/22	6,43	5,80	37,3	0,73	27,10	31,3	31,3	99,9	31,30

Fonte: adaptado de dados internos de FBDM.

Na Tabela 4 é apresentada as medições na região do WRI (rampas e galerias de estudos) de desenvolvimento da galeria.

Tabela 4. Medições realizadas no WRI

Local	Data	Área			Medição Ventilação		Medição temperatura (°C)			Temp Efetiva
		Larg	Altura	m²	m/s	m³/s	Seca (%)	Úmida (%)	Relativa (%)	
Rampa ascendente acima do W12	06/22	4,36	4,55	19,8	0,59	11,66	29,0	24,6	70,3	25,92
Face da rampa ascendente acima do W12	06/22	-	-	0,0	0,0	0,0	-	-	-	0,0
Rampa entre W14 e W12	06/22	4,6	4,08	18,8	0,91	17,14	29,0	24,7	70,6	25,99
Rampa entre W15 e W14/W13	06/22	6,0	4,87	29,2	0,54	15,88	28,0	23,1	66,2	24,57
Retorno de ventilação da área WRI	06/22	6,8	4,89	33,3	0,51	17,09	29,1	25,1	71,5	26,3

Fonte: adaptado de dados internos de FBDM.

É possível observar a partir da Tabela 6 que todas as medições das temperaturas estão dentro do limite de tolerância (30°C) diferente da região apresentada na Tabela 4.

4.2 ESTUDOS DE TEMPERATURA

A utilização do RV08 (raise de ventilação) para adução de ar para a Mina, e principalmente para o seu circuito interligado diretamente com o R4 acesso 2 (rampa que liga a área do estudo), deve ser mantido, pois há uma grande diferença da temperatura do ar que chega ao EDeep (galeria mais profunda e de estudo) via rampa, ao ar que chega no R4 via raise, como mostrado na Tabela 3.

Na Tabela 3 é observado as medições que foram realizadas. Neste caso é visto que a temperatura do ar chegando no EDeep apresenta 31,3 °C. Esta temperatura está acima do limite de tolerância, considerando que o limite seria de 30°C para a temperatura efetiva, ou de IBUTG. O ar chegando no R4 (rampa de estudo) via raise, está com a temperatura efetiva de 28,8°C, estando dentro dos limites de tolerância. Este circuito de ventilação deverá ser mantido, e preferencialmente, sem ser contaminado pelo ar da rampa onde transitam a frota de caminhões.

Como sugestão, caso seja possível, sugerimos a instalação de um portão de ventilação na travessa de acesso da rampa ao nível 560 para impedir a contaminação do ar que vem da superfície via RV08.

Outra possibilidade da manutenção da temperatura para os trabalhos na área do R4, seria a instalação de uma central de climatização do ar na superfície, no emboque RV08 (raise da mina). Estas centrais de climatização, são compostas por splits de ar-condicionado, que podem descarregar um ar com temperatura de 16°C na adução de ar do RV08, diluindo desta forma a temperatura do ar para o R4.

4.3 PARECER GERAL DAS MEDIÇÕES DE VENTILAÇÃO NA MINA

A Vazão total (358 m³/seg) de ar da Mina está inferior à demanda de ar calculada (465,16 m³/seg) para a Mina, conforme a NR 22 (norma regulamentadora da mineração). Para essa demanda de ar atender à NR22.24.8 /C (vazão de ar fresco em função da tonelagem mensal) se faz necessário ajustar o sistema de ventilação.

Na Tabela 5 é apresentado o dimensionamento do mês de julho de 2022. É necessário que os dados de produção, explosivos e frota de equipamentos estejam atualizados para efetuar os cálculos da vazão de ar na mina e assim poder fazer um comparativo do que a NR (norma regulamentadora) solicita com o que está sendo executado.

Tabela 5. Dimensionamento da vazão de ar

Mês	Produção – Rocha Desmontada (Ton.)									
	Lavra	Desenvolvimento		Média turno Minério/es téril	Frota Equip. diesel	Pessoal Subsolo		Ar pessoa turno m³/s	Ar Explo Sivo m³/s	Mínimo de ar – NR22.24.8 m³/s
	Minério	Minério	Estéril			Miner.	turno			
Junho 22	133,18	12.18	9.68	1.41	6.08	370	123	292,6	465,1	465,16

Fonte: adaptado de dados internos da FBDM (2022).

Nos simulados executados no Ventsim, para o circuito da ventilação da Mina com o exaustor do ER3 desligado, obteve-se a ventilação total da Mina em 356 m³/seg, mas as medições de vazão de ar medida na adução de ar para a Mina foi de apenas 276 m³/seg.

Os principais motivos desta diferença de vazão de ar medida na Mina X simulados, podem estar associadas aos seguintes motivos:

1º - Exaustores trabalhando com rotação reduzida à nominal

Esta é uma afirmação, pois os exaustores do RV06 e do RV02 estavam trabalhando com a rotação reduzida;

Exaustor do RV06: Rotação nominal = 1190 rpm, rotação de trabalho atual: 900 rpm;

Exaustor do RV02: Rotação nominal = 1750 rpm, rotação de trabalho atual: 1655 rpm;

Motivos dos exaustores estarem trabalhando com baixa rotação:

Exaustor do RV06 estava com alta vibração, possivelmente associada à desbalanceamento e desgaste dos rolamentos. O equipamento foi testado várias vezes com rotações diferentes, em 1050 rpm, 1000 rpm, 950 rpm e finalmente mantido em 900 rpm. Nos testes realizados com a rotação acima de 900 rpm, o equipamento sofreu desarme automático por excesso de vibração. O exaustor está com alto ruído nos rolamentos. Na reunião realizada após as inspeções, foi solicitada uma pronta manutenção deste motor para substituição dos rolamentos, podendo provocar iminente travamento do eixo do motor.

A base do exaustor RV02 está comprometida por oxidação. Foi mantida baixa rotação do equipamento para diminuir o comprometimento da estrutura da base do exaustor.

2º - Desgaste das pás dos exaustores

As pás dos exaustores principais da Mina Fazenda Brasileiro são confeccionadas em fibra de vidro com resina (material composto). Este tipo de material apresenta desgaste devido à abrasividade do fluido exaurido.

É comum encontrar este modelo de pá com desgastes, o que fatalmente produz a redução das dimensões das pás e à perda de eficiência do equipamento.

Por este motivo, recomendamos uma vistoria mais minuciosa das pás dos exaustores.

3º - Alta pressão de trabalho

Uma das alternativas que poderiam estar reduzindo a vazão dos exaustores seria a pressão de trabalho estar acima da pressão nominal.

Nas medições que foram possíveis serem realizadas como mostrado na (Figura 1) foi medida alta pressão de trabalho nos exaustores do RV05 e RV06, 1467 Pascal (149 mmca) e 1215 Pascal (123 mmca).

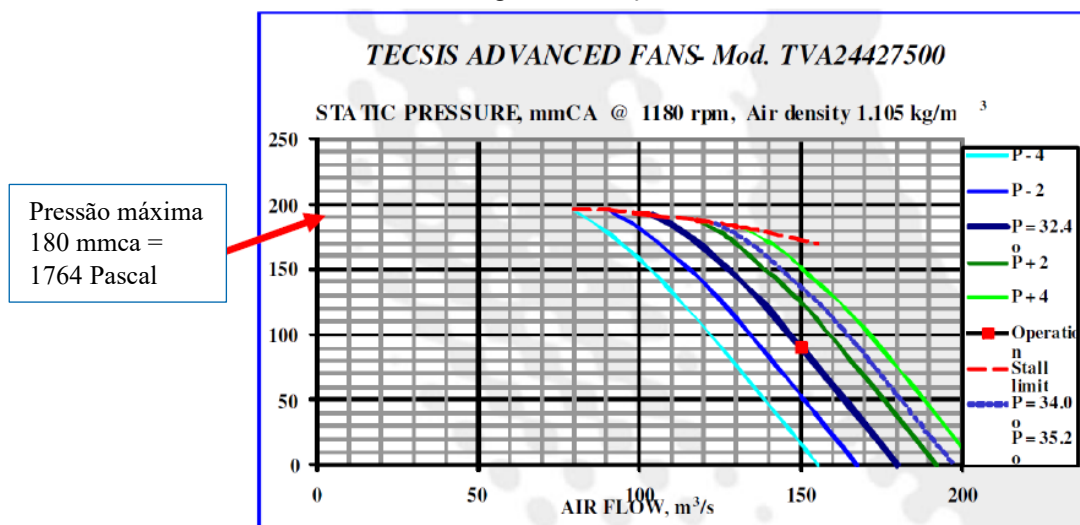
A alta pressão medida no exaustor do RV 05 é justificada pelo motivo do exaustor booster do ER3 estar desligado quando as medições foram realizadas, o que certamente estaria provocando uma obstrução no caminho de ventilação do circuito do RV05.

A alta pressão medida no exaustor do RV06 somente pode ser justificada se no momento da sua medição, o booster do E89 estivesse desligado, mas sem confirmação no momento da medição.

O fato de o rolamento estar com alto ruído, possivelmente devido desgastes, não iria provocar a elevação da pressão do equipamento. Por este motivo, recomendamos uma nova medição da pressão neste exaustor.

Na Figura 1 é mostrado que os exaustores do RV05 e RV06 tem pressão nominal de 882 Pascal (89 mmca) mas apesar da alta pressão, ainda estão trabalhando dentro da curva, que pode alcançar a pressão de até 1764 Pascal (180 mmca).

Figura 1. Medição nos exaustores



Fonte: adaptado de dados internos da FBDM (2022).

Analisando a Figura 1 é possível observar que os simulados realizados com todos os exaustores e boosters em funcionamento, mostra uma pressão estática dos exaustores dentro das curvas e próximas à pressão nominal das especificações técnicas. Portanto, estando o circuito da Mina em operação normal, a pressão dos exaustores deverá estar menor que as medidas em campo, como mostrado nos resultados abaixo com os boosters ligados.

Exaustor do RV05: Pressão nominal = 882,6 Pa, Pressão medida = 595 Pa

Exaustor do RV06: Pressão nominal = 882,6 Pa, Pressão medida = 919 Pa

4.4 ALTERNATIVA PARA AUMENTAR A VENTILAÇÃO DA MINA

Além da execução das manutenções necessárias nos equipamentos (junto às bases de fixação, troca de rolamento e verificação dos desgastes das pás), também poderá ser instalado um exaustor no circuito de ventilação do WRI (rampa do estudo), com vazão mínima de 72 m³/seg.

Esta operação, irá melhorar as condições de trabalho na área do WRI (rampas e galerias de estudos), a qual atualmente está com ventilação deficitária e com a inclusão de maior vazão de ar na Mina, o sistema de ventilação principal irá atender à demanda de ventilação em atendimento à legislação.

Foram realizadas algumas sugestões para criação do raise de exaustão com diâmetro de 2,40 metros, interligando as travessas dos níveis do WRI até a superfície, conforme a Figura 2.

Figura 2. Criação do raise de exaustão



Fonte: adaptado de dados internos da FBDM (2022).

Para este estudo, o exaustor da superfície deverá ter as seguintes especificações mínimas:

Vazão de ar: 72 m³/seg

Pressão estática mínima: 410 Pascal

Motor mínimo: 60 cv

4.5 VENTILADORES

Na Tabela 6 é apresentado a potência dos ventiladores e a capacidade de vazão de ar para aplicação dos ventiladores na mina. Além disso, cada uma dessas características indicam o duto e a distância adequada para aplicação.

Tabela 6. Aplicação dos ventiladores

Ventilador potência	Capacidade de vazão do ar (m ³ /s)	Aplicação do ventilador na Mina	Distância dos dutos de ventilação	
			Ø1000 mm	Ø1200 mm
75 cv	18,5 a 28,5	Ventilação da galeria com uso de apenas uma carregadeira	180 m	-
100 cv	22,0 a 29,0	Ventilação da galeria com uso de apenas uma carregadeira	200 m	-
100 cv	18,5 a 28,5	Ventilação da galeria com uso de apenas uma carregadeira	330 m	-
125 cv	21,0 a 37,0	Ventilação de rampa e galeria com uso simultâneo de uma carregadeira e um caminhão	25 m	80 m

Fonte: adaptado de dados internos da FBDM (2022).

Na Tabela 6 observa-se os ventiladores de 75 cv e 100 cv e é possível identificar que não produzem vazão de ar suficiente para atividades simultâneas de uma carregadeira e um caminhão, pois é necessário uma vazão de 35,97 m³/seg para a ventilação desta atividade, e os ventiladores de 75 cv e 100 cv produzem no máximo uma vazão de 29 m³/seg. Para as atividades em galeria em fundo de saco (galeria onde só há um acesso de entrada e saída), com utilização simultânea de uma carregadeira e um caminhão, somente os ventiladores Epiroc de 125 cv produzirão vazão de ar suficiente para esta operação.

Tem-se na Tabela 7 os valores de vazão obtidos com o ventilador de 125 cv com diversos diâmetros de dutos de ventilação.

Tabela 7. Aplicação de ventiladores em galerias

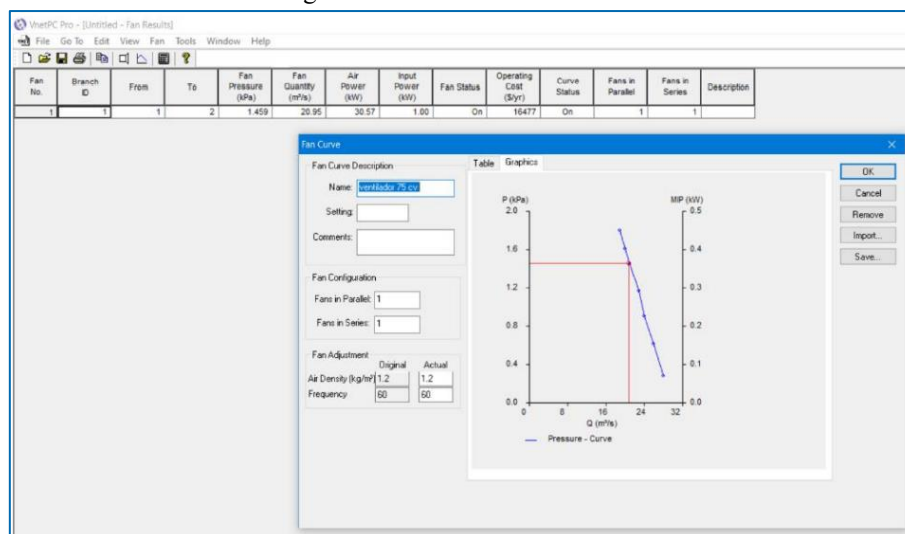
Duto de ventilação	Dist máx de coluna de dutos de ventilação	Vazão de ar(m³/seg)	
		Necessária	Produzida
Ø 1200 mm	80 metros	35,97	36,1
Ø 1300 mm	1120 metros	35,97	36,0
Ø 1400 mm	170 metros	35,97	36,0

Fonte: adaptado de dados internos da FBDM (2022).

A Tabela 7 mostra que os ventiladores de 125 cv para aplicação de ventilação em galeria e rampa com utilização simultânea de uma carregadeira e um caminhão. Podemos observar que um duto de ventilação de 1200 mm atende uma distância máxima de 80 m, obtendo uma vazão de 36,1m³/s.

Na Figura 3 é apresentado o resultado do processo de simulação dos ventiladores no software VnetPc Ventilador 75 cv. Foi utilizado uma carregadeira e uma extensão de 180 m de dutos, com diâmetro (Ø) de 1000 mm. A vazão obtida foi de 20,95m³/seg.

Figura 3. VnetPc Ventilador 75 cv

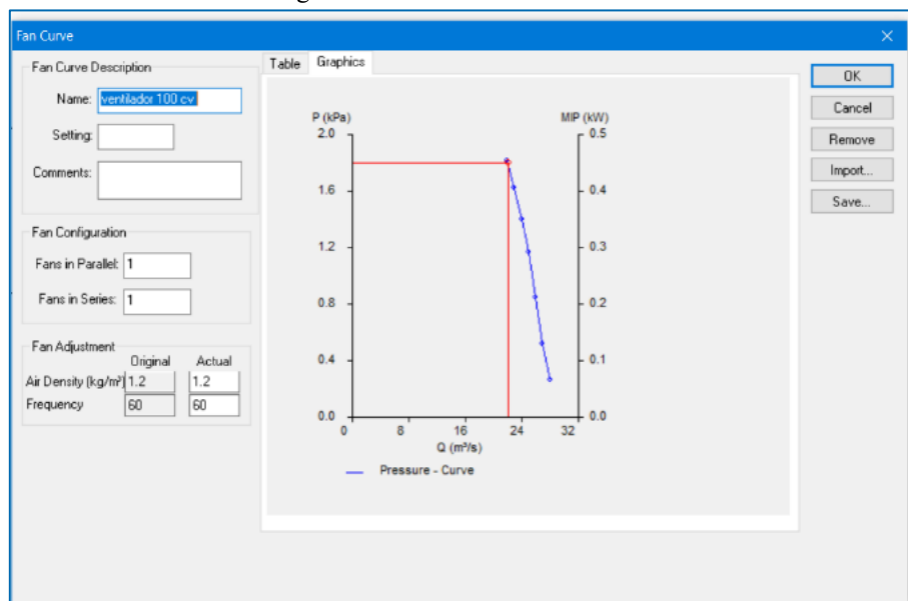


Fonte: adaptado de dados internos da FBDM (2022).

A Figura 3 apresenta um gráfico com resultado da simulação do ventilador de 75cv. No eixo Y a esquerda está determinada o KPa (unidade-padrão de pressão segundo o SI), no eixo Y na direita indica a unidade de pressão em MP (mega pascal) e no eixo X a vazão Q(m³/s). É possível notar que a interação (linha vermelha) determinou a curva de pressão (linha azul) indicando o resultado da vazão.

Na Figura 4 é mostrado o resultado processo de simulação dos ventiladores no software VnetPc Ventilador 100 cv. Foi utilizado uma carregadeira e uma extensão de 200 m de dutos, com diâmetro (Ø) 1000mm. A vazão obtida foi de 22,09 m³/s.

Figura 4. VnetPc Ventilador 100 cv

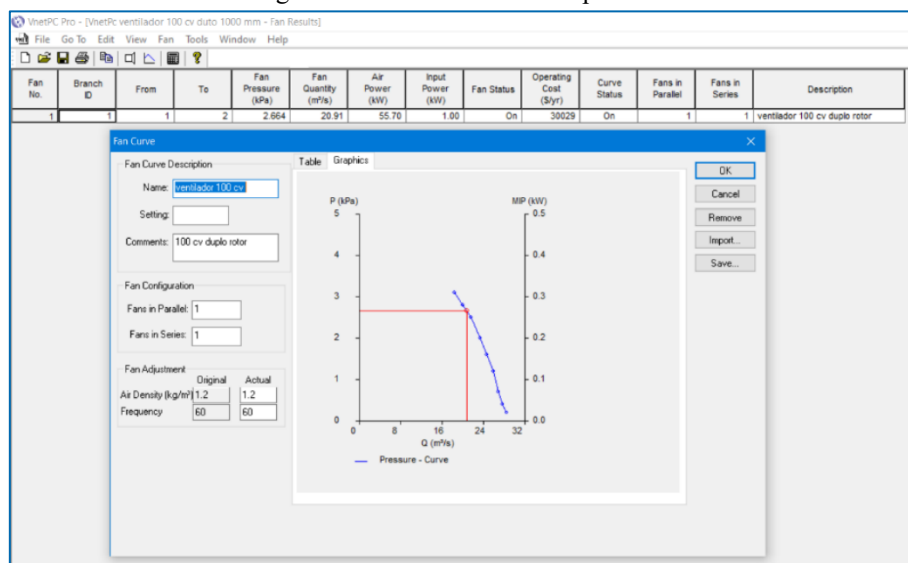


Fonte: adaptado de dados internos da FBDM (2022).

A Figura 4 mostra um gráfico com resultado da simulação do ventilador de 100cv. No eixo Y a esquerda está determinada o KPa (unidade-padrão de pressão segundo o SI), no eixo Y na direita indica a unidade de pressão em MP (mega pascal) e no eixo X a vazão $Q(m^3/s)$. É possível notar que a interação destacada em vermelho determinou a curva de pressão em azul indicando o resultado da vazão.

Na Figura 5 é mostrado o resultado do processo de simulação dos ventiladores no software VnetPc Ventilador 100 cv duplo rotor. Foi utilizado uma carregadeira e uma extensão de 333 m de dutos, com diâmetro ($\varnothing$) de 1000 mm. A vazão obtida foi de $20,91m^3/s$.

Figura 5. Ventilador 100 cv duplo rotor

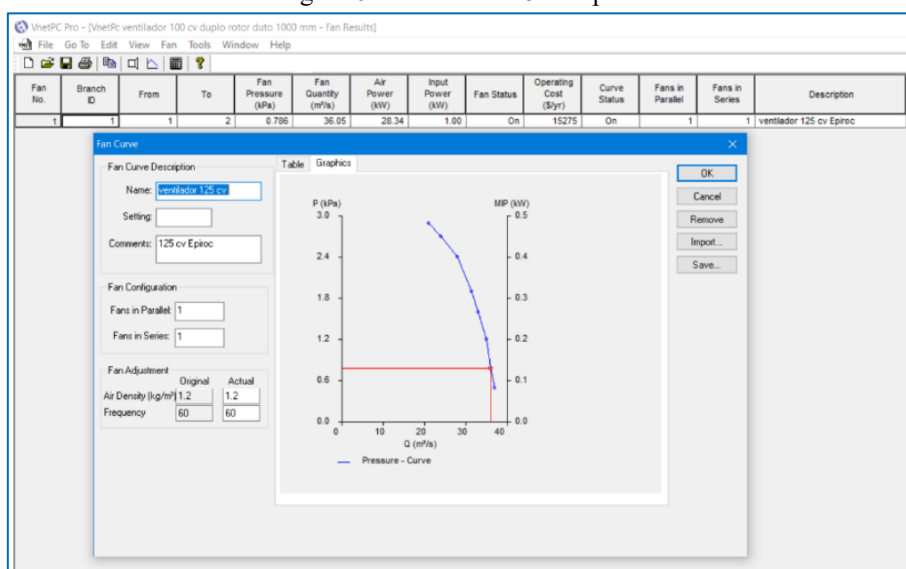


Fonte: adaptado de dados internos de FBDM.

A Figura 5 mostra um gráfico com resultado da simulação do ventilador de 100cv com duplo rotor. No eixo Y a esquerda está determinada o KPa (unidade-padrão de pressão segundo o SI), no eixo Y na direita indica a unidade de pressão em MP (mega pascal) e no eixo X a vazão Q(m³/s). É possível notar que a interação destacada em vermelho determinou a curva de pressão em azul indicando o resultado da vazão.

Na Figura 6 é mostrado o resultado do processo de simulação dos ventiladores no software VnetPc Ventilador 125 cv Epiroc. Foi utilizado uma carregadeira e uma extensão de 80 mts de dutos, com diâmetro (Ø) de 1200 mm. A vazão obtida foi de 36,1 m³/seg.

Figura 6. Ventilador 125 cv Epiroc

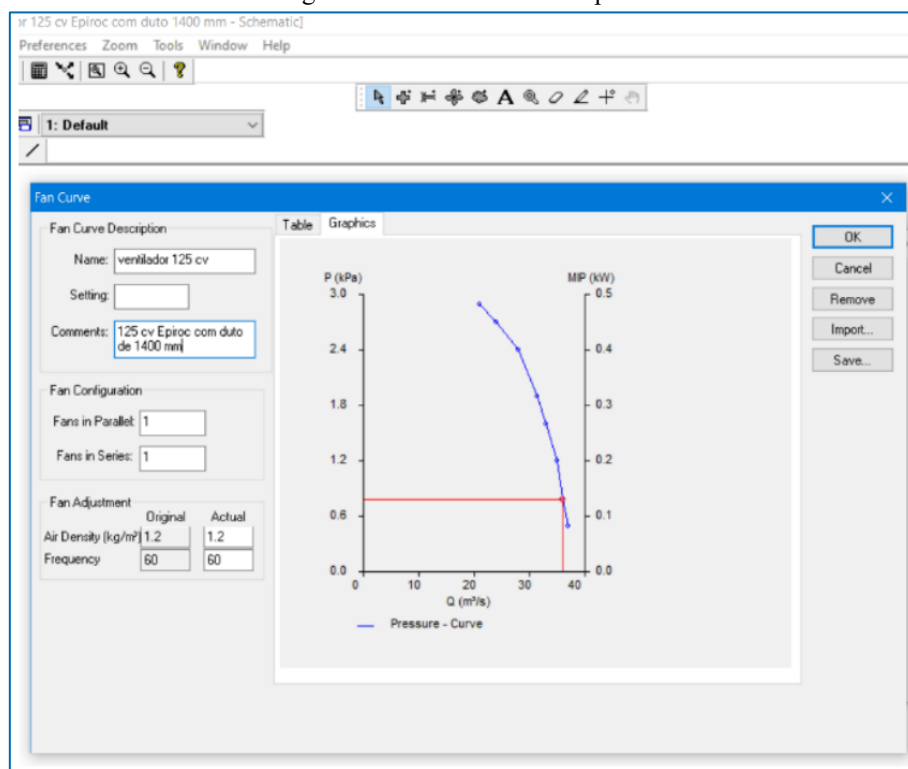


Fonte: adaptado de dados internos da FBDM (2022).

A Figura 6 apresenta um gráfico com resultado da simulação do ventilador de 125cv Epiroc. No eixo Y a esquerda está determinada o KPa (unidade-padrão de pressão segundo o SI), no eixo Y na direita indica a unidade de pressão em MP (mega pascal) e no eixo X a vazão Q(m³/s). É possível notar que a interação destacada em vermelho determinou a curva de pressão em azul indicando o resultado da vazão.

Na Figura 7 é mostrado o resultado processo de simulação dos ventiladores no software VnetPc Ventilador 125 cv Epiroc. Foi utilizado uma carregadeira e uma extensão de 170 m de dutos, com diâmetro (Ø) de 1400 mm. A vazão obtida foi de 36,0 m³/seg.

Figura 7. Ventilador 125 cv Epiroc



Fonte: adaptado de dados internos da FBDM (2022).

A Figura 7 mostra um gráfico com resultado da simulação do ventilador de 125cv Epiroc. No eixo Y a esquerda está determinada o KPa (unidade-padrão de pressão segundo o SI), no eixo Y na direita indica a unidade de pressão em MP (mega pascal) e no eixo X a vazão Q (m³/s). É possível notar que a interação destacada em vermelho determinou a curva de pressão em azul indicando o resultado da vazão.

4.6 SISTEMA DE VENTILAÇÃO DO WRI (RAMPA DE ESTUDO)

Foi realizada uma detalhada medição de ventilação em toda a área do WRI (rampa do estudo), onde foram coletadas medições da vazão de 17,09 m³/s de ar limpo entrando para a área do WRI. Entretanto esta vazão de ar é insuficiente para ventilar as atividades onde haja trabalho com equipamentos a diesel.

Depois da realização de alguns estudos, será necessária a seguinte vazão de ar:

- Atividades de limpeza com uma carregadeira: 20,85 m³/seg.
- Atividades de limpeza utilizando uma carregadeira e um caminhão: 35,97 m³/seg.

Foi medida a vazão de 11,66 m³/s de ar na rampa ascendente acima do W12. Essa vazão de ar também é insuficiente para ventilar uma frente de serviço com equipamento à diesel.

A tubulação de ventilação da face da rampa ascendente do WRI estava à 35 metros da frente de serviço. Por estar em curva, o fluxo de ar na saída do duto de ventilação estava sendo direcionado para a lateral da rampa e por este motivo não estava chegando nenhum fluxo de ar na frente de serviço.

Na frente de escavação da rampa, foi medida as seguintes velocidades do ar:

- Medição nº1: Velocidade do ar = 0,02 metros/seg.
- Medição nº2: Velocidade do ar = 0,00 metros/seg.
- Medição nº3: Velocidade do ar = 0,00 metros/seg.

Essas velocidades de ar na frente de serviço, não permite nem mesmo o acesso de pessoas neste local, conforme descritos na norma NR 22.24.10. A velocidade do ar no subsolo não deve ser inferior 0,2 metros/seg.

A longa distância da coluna de dutos de ventilação até a face de trabalho, também deverá ser revisada na mineração, conforme a NR 22.24.18. Todas as galerias de desenvolvimento, após dez metros de avançamento, e obras subterrâneas sem comunicação ou em fundo-de-saco devem ser ventiladas através de sistema de ventilação auxiliar e o ventilador utilizado deverá ser instalado em posição que impeça a recirculação de ar.

Entende-se nesta Norma, que após 10 metros de avanço da galeria, já deverá haver ventilação instalada, e que o duto de ventilação esteja instalado a 10 metros da frente de serviço.

É de conhecimento de todos que os dutos de ventilação instalados a 10 metros da frente de trabalho serão danificados por fragmentos de rocha no ato do desmonte, por este motivo, a maioria das minerações subterrâneas adotam a seguinte padronização;

- Peças de dutos de ventilação com comprimento de 10 metros;
- Utilização de um duto de ventilação com comprimento de 5 metros na ponta da tubulação, considerado como duto de sacrifício, pois sofrerá danos nas detonações e por este motivo deverá ser considerado como duto provisório.
- Distância máxima da coluna de dutos definitivos em relação á frente de serviço = 25 metros.

Ao avançar 25 metros da frente de serviço, o duto de sacrifício é retirado da ponta da tubulação. Em seguida é instalado um duto definitivo, mantendo assim a ponta da tubulação definitiva à 15 metros da face. Neste deverá ser instalado o duto de sacrifício, tornando assim, a extremidade da coluna de dutos de ventilação em uma distância de 10 metros da frente de serviço.

A ventilação da área do WRI (rampa do estudo) deverá ser modificada, tanto para os trabalhos de desenvolvimento, quanto para as atividades de lavra.

4.6 VALIDAÇÃO DO ARQUIVO DO VENTSIM

Após as alterações das informações inseridas no software Ventsim, foi realizada uma comparação aos valores obtidos nos resultados dos simulados com os valores medidos na mina. Os resultados validam a revisão do Ventsim, conforme observado na Tabela 8.

Tabela 8. Revisão do Ventsim

Temperatura do ar na mina chegando no R4	Temperatura do ar no software chegando no R5
TBS – 33,8°C	TBS – 34,7°C
TBU – 26,7°C	TBU – 30,5°C
Umidade – 58%	Umidade – 73%

Fonte: adaptado de dados internos da FBDM (2022).

A Tabela 8 exibe os resultados das medições no R4 (rampa) onde é possível notar que a temperatura de bulbo seco foi de 33,8°C, temperatura de bulbo úmido com 26,7°C e umidade de 58%. Quando comparado as medições com a modelagem, o software Ventsim confirma os resultados.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos em relação as medições de temperatura nas galerias demonstram que em algumas regiões mais profundas (EDeep) a temperatura alcança 31,3°C, necessitando de melhorias na exaustão, conforme as NRs (normas regulamentadoras). Porém, a rampa de estudo (R4) apresenta uma temperatura dentro dos limites, e não necessita de alterações em seu circuito de ventilação.

A partir desse estudo constatou-se a necessidade da implementação do sistema de ventilação no WRI (rampa de estudo), visando aprimorar as condições laborais na respectiva galeria, que atualmente enfrenta deficiências na ventilação.

Também foi definido que os ventiladores das galerias devem apresentar 20,85 m³/seg, ao trabalhar apenas com uma carregadeira para a atividade de limpeza e 35,97 m³/seg nas atividades que são usadas uma carregadeira e um caminhão. Essas propostas de vazão de ar são fundamentais para o sistema de ventilação principal e para cumprimento das exigências legais.

As informações obtidas dos ensaios de simulação descrevem que os ensaios referente aos ventiladores 75 cv, 100 cv e o de 100 cv duplo rotor apresentam baixa vazão. Enquanto que os ensaios referente aos ventiladores 125 cv Epiroc possui uma vazão média de 36,0 m³/seg, estando dentro das especificações exigidas para a realização dos trabalhos em mina subterrânea.

REFERÊNCIAS

ANON. **Risk Assessment and Management, Leading Practice**. 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6022**: informação e documentação: artigo em publicação periódica técnica e/ou científica: apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

BRASIL, A. C. S. **Climatizador móvel para melhoria operacional da temperatura em mina subterrânea**. 2022. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/12494>. Acesso em: 12 nov. 2023.

COSTA, J.C.A. **Estudos para implantação de um modelo de ventilação sob demanda no complexo mineiro de Ipueira**. Andorinha: Universidade Federal de Campina Grande, 2017.111p. (Tese, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos. 2017.

DE CARLI, C. **Análise de projetos limite: lavra a céu aberto x lavra subterrânea**. Tese (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais. Rio Grande do Sul, 2013. Hartman, H.L. Mine ventilation and air conditioning. Wiley Interscience, v.2, p.3-67, 1982.

HARTMAN, H.L. MUTMANSKY, J.M. **Introductory Mining Engineering**. 2ª. Ed. John Wiley and Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, 2002.

HARTMANN, H. L.; Mutmanský, J. M.; Ramani, R. V.; Wang, Y. J. **Mine Ventilation and Air Conditioning**. 2.ed. Alabama: Wiley Interscience, 1991. 791p

MACÊDO, A. J. B.; BAZANTE, A. J.; & BONATES, E. J. L. **Seleção do método de lavra: arte e ciência**. Rem: Revista Escola De Minas, 54(3), p.221–225. 2001. <https://doi.org/10.1590/S0370-44672001000300010>> Acesso em 10 de novembro de 2023.

MCPHERSON, M. J. **Subsurface ventilation engineering**. Mine Ventilation Services. 2009. disponível em: <www.mvsengineering.com/downloads>. Acesso em 10 de novembro de 2023.

Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma reguladora N°22 (NR-22)**. Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração. 1978. Acesso disponível< <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/normas-regulamentadora/normas-regulamentadoras-vigentes/norma-regulamentadora-no-22-nr-22> >. Acesso em 17 de novembro de 2025.

PINTO, P. C. **Construção de modelos computacionais de redes de fluxo para circuitos de ventilação de minas em subsolo**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, 2004.193p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação Em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais.

TORRES, V. F. N.; GAMA, C. D. **Engenharia Ambiental Subterrânea e aplicações**, p. 81-158. 2005.

VUTUKURI, V.S., & Lama, R.D. **Environmental engineering in mines**. Cambridge University Press. New York, p.504;Xiaojie, Y., Qiaoyun, H., Jiewen, P., Xiaowei, S., Dinggui, H., Chao, L. (2011). Progress of heat-hazard treatment in deep mines. Mining Science and Technology (China), 21(2), 295–299, 2010.

XIAOJIE, Y.; QIAOYUN, H.; JIEWEN, P.; XIAOWEI, S.; DINGGUI, H.; CHAO, L. **Progress of heat-hazard treatment in deep mines**. Mining. Science and Technology (China), 21(2), p. 295–299, 2011.

UTILIZAÇÃO DO SISTEMA DE DESPACHO VISANDO MELHORIAS NA PRODUÇÃO DE UMA MINA SUBTERRÂNEA

  10.56238/livrosindi202529-005

Augusto Biancart Souza Miranda

Bacharel (2019) em Ciência e Tecnologia e Engenheiro de Minas (2023) pela UFVJM, Janaúba, Brasil
E-mail: augusto.biancart@ufvjm.edu.br

Gerson Ferreira da Silva

Engenheiro de Minas (2004) e Mestre (2019) em Engenharia de Minas e Petróleo pela UFCG
Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (2023) pela UFRGS
Professor Adjunto do curso de Engenharia de Minas da UFVJM, Janaúba, Brasil
E-mail: gerson.ferreira@ufvjm.edu.br

RESUMO

A mineração no mundo está sempre em busca de obter ganhos operacionais, de tal forma a garantir uma redução nos custos, visto que o mercado de commodities está sempre em oscilação. Neste caso, o acompanhamento em tempo real das informações de produção, torna-se fundamental na busca de estratégias para a otimização das operações em uma mina. O sistema de despacho garante a confiabilidade das informações geradas, possibilitando as tomadas de decisões estratégicas. Esse trabalho apresenta as alternativas aplicadas em um sistema de despacho, para o efetivo aumento da produtividade da frota de carregamento e transporte. Os resultados obtidos nesta pesquisa, apontam que o acompanhamento dos indicadores-chave de desempenho (KPIs) e o monitoramento de um sistema de despacho, permitem definir a alocação dos equipamentos de carga e transporte de forma otimizada, priorizar as frentes de limpeza, e aumentar a produtividade de uma mineração subterrânea.

Palavras-chave: Despacho eletrônico, Mina subterrânea, Indicadores de desempenho, Produtividade.

1 INTRODUÇÃO

A extração de bens minerais é considerada uma atividade essencial para a sobrevivência do ser humano e principalmente no desenvolvimento de novas tecnologias, e ambas estão diretamente relacionadas com a mineração. Por meio desta atividade garantimos a extração de recursos primordiais para as indústrias. No Brasil, a mineração é responsável por exportar minérios para todo mundo, contribuindo para o desenvolvimento econômico do país e das regiões onde ocorre a exploração mineral (SANTOS, 2021).

Com o passar dos anos a mineração a céu aberto vem sofrendo com a diminuição das reservas superficiais de alto teor e o crescimento populacional aumenta a demanda de matéria prima, fazendo ser necessário a busca por reservas em subsolo. A mineração em subsolo visa suprir a necessidade dos bens minerais, e a relação estéril/minério é menor em consideração a céu aberto, influenciando em muitos casos na viabilidade de alguns depósitos (DONEVA et al, 2015). De forma geral para um depósito se tornar de fato um empreendimento, são realizados um séries de estudos que englobam as áreas de geologia, hidrogeologia, mecânica de rochas, meio ambiente, social, financeira,

engenharia e várias outras. Os resultados desses estudos, vão definir se um determinado depósito é viável ou não (FERRAZ, 2022). A mineração subterrânea é composta por algumas etapas, entre as quais estão o desenvolvimento e a lavra. A extração da substância mineral é iniciada após a fase de desenvolvimento, etapa inicial de um empreendimento, com o objetivo de alcançar os corpos de minério e prepará-los para serem lavrados (ROSMANINHO, 2021). A mineração no mundo está sempre em busca de obter ganhos operacionais, de tal forma a garantir a redução dos custos e aumentar a produção. Essa busca é importante, visto que o mercado de commodities do setor minerário está sempre em oscilação (LACERDA, 2019).

Diante da necessidade em aumentar a produtividade das empresas de mineração, é imprescindível a inserção de tecnologias em suas operações. A ferramenta tecnológica é fundamental para o acompanhamento em tempo real das informações de produção, visando buscar estratégias para a otimização das operações uma mina subterrânea. O sistema de despacho garante a confiabilidade das informações geradas, possibilitando a tomadas de decisões estratégicas, com o objetivo de garantir uma produção mais eficiente (OLIVEIRA, 2018).

A realização desta pesquisa permitiu verificar a aplicação do sistema de despacho em uma mina subterrânea, visando o aumento da produtividade da frota de carregamento e transporte. Em relação ao emprego do sistema de despacho, o mesmo possibilitou o entendimento das informações operacionais dos equipamentos, visando otimizar o sistema de acompanhamento e monitoramento da frota, a fim de melhorar a sua eficiência e produção.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 LAVRA DE MINÉRIOS

Santos (2021) define lavra de minério como um conjunto de operações unitárias visando a exploração de um recurso mineral de um empreendimento. O autor classifica em seu trabalho a lavra em dois grandes grupos: lavra de mina subterrânea e lavra de mina a céu aberto. Os grupos englobam diferentes técnicas de exploração mineral, que configuram como métodos de lavra. Em seu trabalho Ferraz (2022) destaca a importância de realizar uma boa escolha do método de lavra, pois o método de lavra a ser escolhido influencia diretamente na análise da economicidade da mina, e os impactos diretos na prospecção ou não do empreendimento mineral. A seleção do método de lavra engloba algumas condicionantes, tais como: ser o método mais econômico, apresentar segurança, estabilidade e resistência do maciço rochoso, geometria do corpo mineralizado (espessura e inclinação), a utilização ou não de suporte seja ele natural ou não, mão de obra, tamanho da mina, o mínimo de impacto ambiental, processos de beneficiamento necessários e custos (SILVA, 2022).

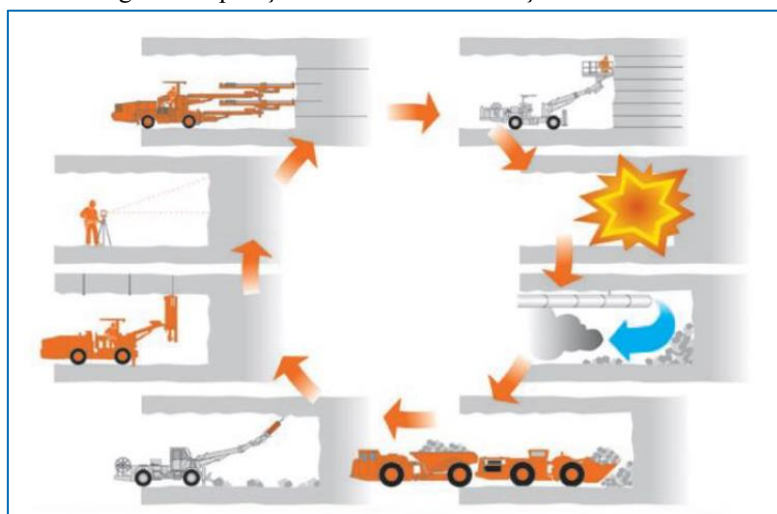
2.2 LAVRA SUBTERRÂNEA

Devido a necessidade de suprir o desenvolvimento tecnológico da sociedade, a lavra de mina subterrânea é uma modalidade da mineração que vem ganhando espaço no mundo da mineração, essa modalidade está alcançando corpos profundos onde a lavra a céu aberto é inviabilizada pela relação de estéril/minério. A lavra de mina subterrânea está se desenvolvendo tecnologicamente ao longo dos últimos anos (SILVA, 2022).

2.3 OPERAÇÕES UNITÁRIAS

As operações unitárias de uma mina subterrânea são determinadas pelo ciclo de desenvolvimento, o tipo de ciclo realizado é de acordo com o tipo de litologia. As operações unitárias são: perfuração, carregamento de explosivos, desmonte, exaustão, limpeza (carregamento e transporte), saneamento, contenções e marcações topográficas (Figura 1). Então a cada ciclo realizado, uma seção de galeria é aberta, o ciclo básico pode ser alterado de acordo com o método de lavra, que em tese é a sequência do processo de desenvolvimento (ROSMANINHO, 2021).

Figura 1. Operações unitárias na mineração subterrânea.



2.4 CARREGAMENTO

Após a detonação o material é preparado para o carregamento e transporte, sendo realizado a umidificação do material, a fim de diminuir a dispersão de material fino. Em sequência os equipamentos de carga são destinados as frentes para que possam efetuar o carregamento do material, em seguida o material é transportado para o local de descarga ou ocorre a deposição nos caminhões (QUEVEDO, 2009).

2.5 TRANSPORTE

Os equipamentos de transporte têm a função de realizar o transporte do material entre a lavra e um ponto de descarga, que varia de acordo com o que está em transporte. Neste caso, podendo ser material estéril, sendo encaminhado a pilha de estéril controlado, minério para estoque ou minério enviado a usina de beneficiamento, visando a alimentação dos britadores de mandíbulas ou giratórios. Os tipos de transporte mais utilizados são os caminhões ou as correias transportadoras (NOGUEIRA, 2019).

2.6 DESPACHOS ELETRÔNICOS

Oliveira (2018), apresenta o sistema de despacho como responsável pelo gerenciamento e otimização das operações unitárias da mina, realizando o monitoramento e principalmente o transporte de minério. O despacho eletrônico é um software que engloba, em tempo real (quando todas as frentes de serviço possuem rede de comunicação), informações de toneladas de material retirado por frente de serviço. O software propõe a determinação correta de equipamentos necessários para realizar as atividades de carga e transporte, e define a melhor rota com menor distância média de transporte.

De acordo com a Sodep (2023), um sistema de despacho eletrônico é estruturado da seguinte maneira, em cada equipamento de carga e de transporte, é instalado um computador de bordo (tablet), atrelados a uma rede de comunicação sem fio, que é responsável por enviar diversas informações, entre elas: localização, estado, operador e carregamento, para a central de controle, gerando em tempo real uma interface gráfica (SODEP, 2023). Através de uma rede de comunicação própria, ocorre a comunicação entre os equipamentos, as antenas e a central de controle, possibilitando o monitoramento de toda a frota e produção da mina, com segurança e com um alto nível de detalhes. O sistema oferece o monitoramento de cada equipamento em todas as fases do ciclo produtivo. No caso do minetrack, sistema de despacho da Sodep, são exibidos alguns relatórios gerenciais que conseguem integrar dados de tempo e produção, proporcionando uma visão completa do desempenho das operações. Como resultado, são gerados os relatórios que realmente auxiliam no monitoramento e na criação de ações de melhoria de desempenho (SODEP, 2023).

Para a mineração subterrânea nem todas as galerias possuem acesso à internet, alguns casos uma mina inteira não possui acesso à internet, logo todas as informações realizadas em um determinado período são armazenadas internamente no computador de bordo. E quando o dispositivo é conectado à internet, o mesmo envia as informações para a rede e são registradas no banco de dados (SODEP, 2023).

Segundo Lacerda (2019), em geral um sistema de despacho é composto por um algoritmo de sequenciamento de viagens, estabelecendo conexão entre os equipamentos de carga, transporte e a central de comandos, ou centro de controle operacional (CCO). O algoritmo auxilia em tomadas de decisões de acordo com o cenário atual da mina, ou seja, das frentes de serviço, dos dados coletados em tempo real, e dos dados imputados pela equipe técnica (LACERDA, 2019). De acordo com Oliveira (2018), é gerado um banco de dados de informações, a partir de vários registros de operações, que são chamados de estados. Os estados são informados pelos operadores no computador de bordo do equipamento. Essa operação é classificada como apontamento, e para obter todos esses dados, são realizadas consultas pré-determinadas, desenvolvidas em linguagem SQL. Através das consultas são gerados relatórios customizados sobre os dados coletados durante as operações em tempo real.

A alocação dinâmica de equipamentos de carga e transporte, é uma grande ferramenta proporcionada pelo sistema de despacho, possibilitando determinar a taxa da limpeza atribuída para cada frente de serviço, levando em consideração a produção dos equipamentos, ou seja, criando um fluxo de trabalho a fim de evitar horas improdutivas, como as filas de caminhões. Conforme for surgindo a necessidade de um equipamento pode ser realocado em uma nova frente de serviço, ou em outro ponto de basculamento, com isso ocorre o aumento da produtividade da frota de carga e transporte (COSTA, 2005)

2.7 KPIS – INDICADORES-CHAVE DE DESEMPENHO

De acordo com Santos (2021), os indicadores-chave de desempenho é uma ferramenta de suma importância na mineração. Os KPIs são análises de parâmetros operacionais visando encontrar falhas nos processos, e quando aplicado uma tratativa, possibilita obter ganhos operacionais. Ao realizar análise de KPIs decisões estratégicas podem ser tomadas (Figura 2), visando à otimização de processos para obtenção de grandes resultados. Nunes (2021) apresenta os KPIs no dimensionamento de frota, e na seleção dos equipamentos que serão responsáveis para atender o plano de produção de uma mina. Se tratando de equipamentos, são acompanhados diariamente os KPIs de carregadeiras, caminhões, e demais equipamentos de mineração, a fim de elaborar planos de lavra de curto prazo.

Figura 2. Indicador de desempenho.



Quando se trata de curto prazo a análise de indicadores requer uma abordagem diferente do longo prazo, visto que são esses indicadores que irão definir a capacidade de produção em um espaço temporal menor, onde valores médios do longo prazo não podem ser utilizados. É necessário inserir no plano de curto prazo informações que representem o cenário atual da operação (NUNES, 2021).

Produtividade

O cálculo da produtividade (Eq. 1) de um equipamento, é definido pela razão da massa, em toneladas, movimentada pelo equipamento, e pela quantidade de horas operando. Para equipamentos de carga a produtividade é calculada pela quantidade de material retirado de uma frente de lavra dividida pelas horas operando. No caso, dos equipamentos de transporte é a soma da massa transportada da frente de serviço até o local de báscula, sobre o tempo que foi realizado a atividade. A produtividade de carga pode ser dada também pela quantidade de massa depositada nos caminhões pela quantidade de tempo da operação (SANTOS, 2021).

$$Prod(t/h) = massa\ transportada/carregada(t) / horas\ operando(h) \quad (1)$$

Quando o assunto é produtividade, temos dois tipos: produtividade global e produtividade efetiva. A diferença entre as produtividades se dá pela quantidade de horas que se leva em consideração para realizar os cálculos. Produtividade global, como o próprio nome já diz, considera a soma das horas trabalhadas, horas improdutivas e horas de atraso operacional. Na efetiva considera o tempo que realmente o equipamento está operando (SANTOS, 2021).

3.7.1 Tempo de ciclo das carregadeiras

De acordo com Brito (1994), o ciclo das carregadeiras é definido basicamente por quatro operações (Eq. 2). E ao longo do tempo de trabalho, vão se repetindo de forma cíclica, ou seja, quando finaliza uma sequência de operações, em seguida inicia-se uma nova sequência, obedecendo a mesma ordem anterior. As quatro operações são constituídas por: carga, transporte cheio, descarga e transporte vazio. O tempo de ciclo é obtido quando o equipamento repete o ciclo, esse tempo é medido a partir do momento em que o equipamento inicia uma atividade de operação até o final das operações onde o equipamento retorna à posição inicial. Um aumento de produtividade pode ser obtido possivelmente quando se consegue a redução do tempo de ciclo (BRITO, 1994).

$$T_{ciclo} = cg + tc + dc + tv \quad (2)$$

Onde: cg = enchimento da concha, tc = transporte de concha cheia, dc = descarga, tv = transporte concha vazia.

3.7.2 Tempo de ciclo dos caminhões

O tempo de ciclo de caminhões (Eq. 3) é definido pelo somatório das atividades de operação, tais como: t_{mp} (tempo de manobra e posicionamento), t_c (tempo de carregamento), t_{tc} (tempo de transporte carregado, t_{mb} (tempo de manobra e basculamento) e t_{tv} (tempo de transporte vazio) (NUNES, 2021).

$$T_{ciclo} = t_{mp} + t_c + t_{tc} + t_{mb} + t_{tv} \quad (3)$$

3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento desta pesquisa foi realizado uma ampla revisão bibliográfica por meio de consultas de artigos científicos, dissertações, teses, e revistas especializadas em mineração. Em seguida foi realizado um trabalho de campo, onde foram coletadas informações do sistema de despacho. Neste caso, as informações foram obtidas junto aos operadores de máquinas e equipamentos.

Posteriormente a essa etapa, foi realizado uma consulta SQL no banco de dados do sistema de despacho, a fim de construir um painel com gráficos para exibir as informações sobre a produtividade, esse painel foi construído através do software Power BI da Microsoft. Para o cálculo da produtividade efetiva do carregamento foi utilizado o estado de “Carregando caminhão”, conforme a Figura 3.

Figura 3. Estado de carregamento.



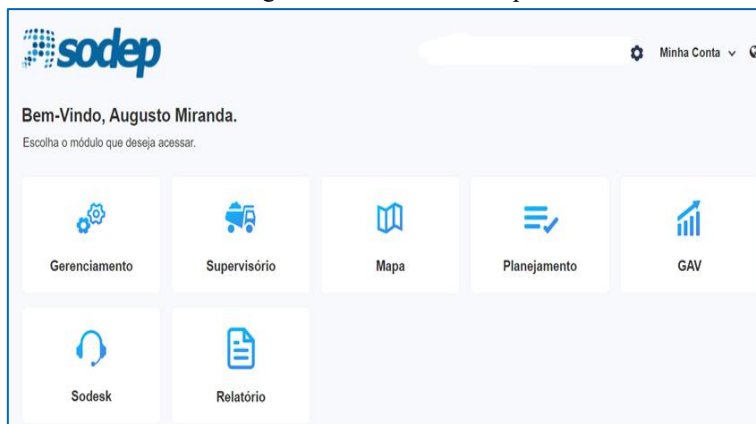
Esse estado representa o tempo de ciclo realizado por uma carregadeira ao carregar um caminhão. O ciclo é realizado da seguinte forma: a carregadeira desloca do ponto de carga na galeria para a face ou realce onde vai estar o material desmontado, o próximo passo é encher a concha de material, deslocar com a concha cheia para o ponto de carga e por fim basculhar no caminhão. Esse ciclo pode se repetir duas ou três vezes de acordo com a capacidade da carregadeira e caminhão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 DESPACHOS ELETRÔNICOS

O sistema de despacho da Sodep o minetrack (Figura 4), nos oferece uma gama de informações sobre os equipamentos, sendo eles em tempo real (quando a mina possuir internet) ou informações registradas em um determinado tempo de utilização do equipamento off line. É possível também obter as informações de localização dos equipamentos, estados realizados, do operador entre outras.

Figura 4. Minetrack Sodep.



O sistema de despacho eletrônico e os computadores de bordo dos equipamentos geram um imenso banco (Figura 5) de dados com informações de horas de operação, horas improdutivas e horas de manutenção.

Figure 5. Banco de dados.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
nome_tipo_estado	nome_estado	tempo_segundos	tempo_minuto	tempo_hora	tempo_formatado	nome_modelo	nome_equipe	nome Equipamento	dt_registro_turno
Improdutiva Externa	38 - Troca de Turno	3021	50,35	0,839166667	00:50:21	Carregadeira ST1030	Equipe C	LHD - 01	22/11/2023 00:00
Improdutiva Externa	38 - Troca de Turno	2700	45	0,75	00:45:00	Carregadeira ST1030	Equipe A	LHD - 01	22/11/2023 00:00
Improdutiva Externa	38 - Troca de Turno	799	13,31666667	0,221944444	00:13:19	Carregadeira ST1030	Equipe A	LHD - 01	22/11/2023 00:00
Improdutiva Interna	29 - Inspeção do Operador	322	5,366666667	0,089444444	00:05:22	Carregadeira ST1030	Equipe B	LHD - 01	22/11/2023 00:00
Improdutiva Interna	29 - Inspeção do Operador	2461	41,01666667	0,683611111	00:41:01	Carregadeira ST1030	Equipe B	LHD - 01	22/11/2023 00:00
Improdutiva Interna	58 - Aguardando Caminhão	1800	30	0,5	00:30:00	Carregadeira ST1030	Equipe D	LHD - 02	17/11/2023 00:00
Improdutiva Interna	58 - Aguardando Caminhão	3021	50,35	0,839166667	00:50:21	Carregadeira ST1030	Equipe C	LHD - 02	22/11/2023 00:00
Improdutiva Interna	109 - Aguardando Despacho	60	1	0,016666667	00:01:00	Carregadeira ST1030	Equipe D	LHD - 02	17/11/2023 00:00
Improdutiva Interna	101 - Aguardando Alocação	480	8	0,133333333	00:08:00	Carregadeira ST1030	Equipe D	LHD - 02	17/11/2023 00:00
Operando	119 - Preparação para o carregamento	300	5	0,083333333	00:05:00	Carregadeira ST1030	Equipe D	LHD - 02	17/11/2023 00:00
Improdutiva Externa	33 - Deslocamento do Equipamento	960	16	0,266666667	00:16:00	Carregadeira ST1030	Equipe D	LHD - 02	17/11/2023 00:00
Operando	08 - Carregando Caminhão	3278	54,63333333	0,910555556	00:54:38	Carregadeira ST1030	Equipe B	LHD - 01	22/11/2023 00:00
Improdutiva Interna	59 - Aguardando Carregadeira	2280	38	0,633333333	00:38:00	Caminhão Ejetor	Equipe D	CB - 05	17/11/2023 00:00
Operando	95 - Movimentando Cheio	660	11	0,183333333	00:11:00	Caminhão Ejetor	Equipe D	CB - 05	17/11/2023 00:00
Improdutiva Interna	59 - Aguardando Carregadeira	1980	33	0,55	00:33:00	Caminhão Ejetor	Equipe D	CB - 05	17/11/2023 00:00
Operando	93 - Carregando	2280	38	0,633333333	00:38:00	Caminhão Ejetor	Equipe D	CB - 01	17/11/2023 00:00
Operando	93 - Carregando	3021	50,35	0,839166667	00:50:21	Caminhão Ejetor	Equipe C	CB - 01	22/11/2023 00:00
Operando	96 - Movimentando Vazio	1620	27	0,45	00:27:00	Caminhão Ejetor	Equipe D	CB - 03	17/11/2023 00:00
Operando	96 - Movimentando Vazio	3021	50,35	0,839166667	00:50:21	Caminhão Ejetor	Equipe C	CB - 03	22/11/2023 00:00
Improdutiva Interna	68 - Filo no Carregamento	1620	27	0,45	00:27:00	Caminhão Ejetor	Equipe D	CB - 05	17/11/2023 00:00
Improdutiva Interna	68 - Filo no Carregamento	3021	50,35	0,839166667	00:50:21	Caminhão Ejetor	Equipe C	CB - 05	22/11/2023 00:00
Operando	95 - Movimentando Cheio	3021	50,35	0,839166667	00:50:21	Caminhão Ejetor	Equipe C	CB - 02	22/11/2023 00:00
Manutenção Corretiva	69 - Manutenção Corretiva	2940	49	0,816666667	00:49:00	Caminhão Ejetor	Equipe D	CB - 04	17/11/2023 00:00
Improdutiva Interna	68 - Filo no Carregamento	1320	22	0,366666667	00:22:00	Caminhão Ejetor	Equipe D	CB - 01	17/11/2023 00:00
Manutenção Corretiva	69 - Manutenção Corretiva	3021	50,35	0,839166667	00:50:21	Caminhão Ejetor	Equipe C	CB - 04	22/11/2023 00:00

Na Figura 6 podemos observar o banco de dados gerado pelo sistema de despacho. Neste caso, identificamos os registros de operações, gerados por todos os computadores de bordo da frota de carga e transporte. Também são geradas informações sobre a quantidade de massa, o tempo de ciclo, o tempo por estado, e as horas improdutivas. Assim foram realizadas consultas através do SQL e foi construído um painel dashboard (Figura 8) contendo relatórios sobre o KPI's dos equipamentos, tornando uma ferramenta de análise de disponibilidade física, utilização, produção, produtividade entre outros KPIs.

Figura 6. Painel dashboard.

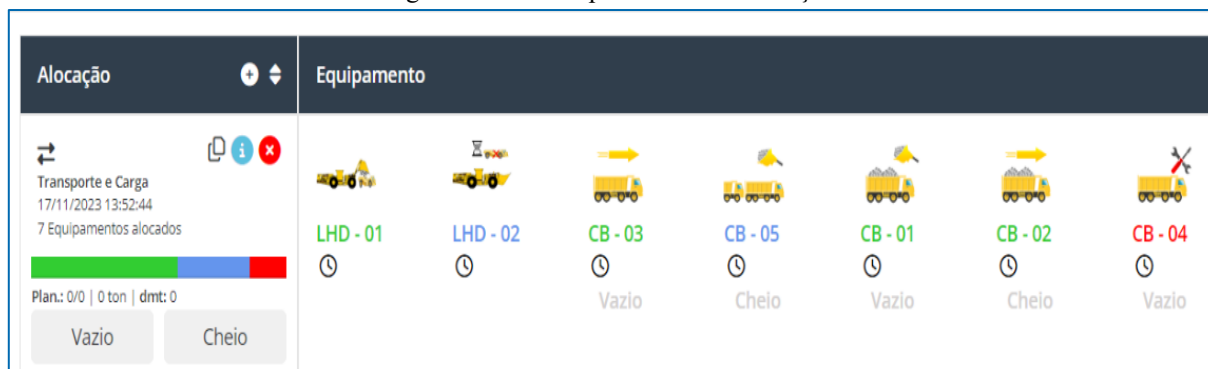
Dashboard Diário de Produção									
PERFORMANCE EQUIPAMENTOS									
		Plano	MTD	20-11	21-11	Plano	22-11	Comentários:	
LHDS	DF %	70%	58,23%	56,71%	65,68%	70%	68,01%	-	
	UT %	30%	37,88%	40,13%	28,07%	30%	44,76%		
	EO %	100%	100%	100%	100%	100%	100%		
	Prod. (ton/h)	90	171	156	178	90	112		
		Plano	MTD	20-11	21-11	Plano	22-11	Comentários:	
CAMINHÕES	DF %	75%	83,74%	74,90%	72,41%	75%	79,93%	-	
	UT %	50%	39,87%	46,74%	40,89%	50%	40,91%		
	EO %	100%	100%	100%	100%	100%	100%		
	Prod. (ton/h)	35	32	25	32	35	27		

A Figura 6 representa o painel que contém inúmeras informações. A partir da construção desse painel dashboard é possível realizar as análises referente aos KPIs da frota de carga e transporte. Esse painel também apresenta as informações de disponibilidade física, de utilização física, e da produtividade. A partir das análises realizadas nos dashboards podemos atuar de forma a otimizar as operações, a fim de obter um ganho operacional. A construção desses dashboard é realizada por softwares, como por exemplo: Excel e Power BI.

4.2 ALOCAÇÃO

No painel supervisorio do sistema de despacho é possível alocar os equipamentos em frentes de serviços, conforme a Figura 7. Assim, podemos observar um cenário no qual toda a frota de equipamentos está alocada.

Figura 7. Painel Supervisorio de Alocação.



A Figura 7 apresenta um fluxo de serviço, onde temos duas carregadeiras e cinco caminhões. A LHD – 01 está realizando o carregamento em uma frente de serviço, o CB – 03 movimentando vazio, o CB – 01 está carregando, o CB – 02 está movimentando cheio, o CB – 05 está aguardando na fila para carregar, e temos o CB – 04 em manutenção corretiva, a LHD – 02 está aguardando caminhão. Percebe-se nessa alocação dois equipamentos com horas improdutivas, o CB – 05 e a LHD – 02.

Abaixo na Figura 8, temos os mesmos equipamentos alocados de forma otimizada. Neste caso, temos uma LHD e dois caminhões realizando a limpeza de uma frente de desenvolvimento, e uma LHD e dois caminhões realizando a limpeza de uma frente de lavra.

Figura 8. Alocação Otimizada.

Alocação	Equipamento			
  Transporte e Carga - Desenvolvimento 17/11/2023 13:21:12 3 Equipamentos alocados Plan.: 0/0 0 ton dmt: 0 Vazio Cheio	 LHD - 02 	 CB - 03  Vazio	 CB - 02  Cheio	
  Transporte e Carga - Lavra 17/11/2023 13:21:01 4 Equipamentos alocados Plan.: 0/0 0 ton dmt: 0 Vazio Cheio	 LHD - 01 	 CB - 01  Vazio	 CB - 05  Cheio	 CB - 04  Vazio

Quando ocorre a divisão das atividades de trabalho e do fluxo dos equipamentos, é possível aumentar a produção, devido a correta distribuição dos equipamentos. Neste caso, será possível evitar as filas no carregamento, e também que a LHD (carregadeira rebaixada) fique aguardando caminhões (ociosa) durante esta operação. Outro fato importante é dá preferência por um ciclo um pouco mais longo, pois diminui significadamente as horas improdutivas dos equipamentos.

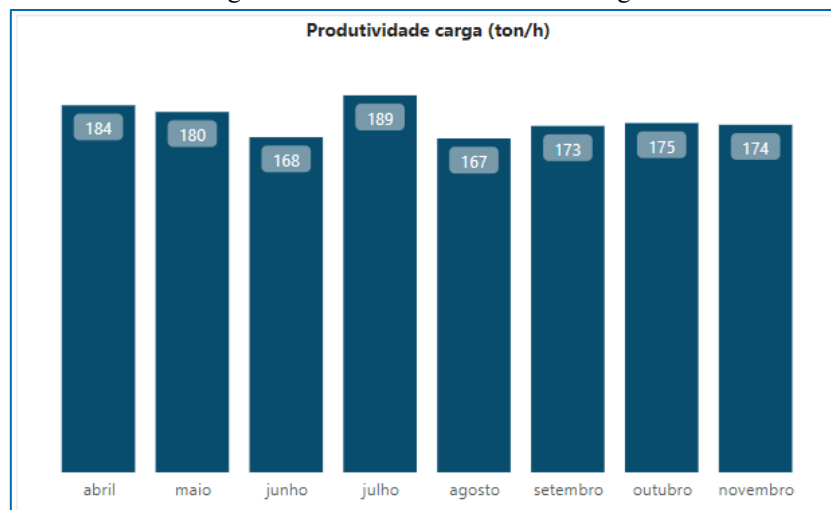
Na Figura 8, também é possível observar que o CB-04 está em manutenção, o mesmo quando liberado deve ser destinado para alguma frente de trabalho. A escolha correta da frente nesse cenário, deve ser em função da frente em que a distância média total (Dmt) seja maior. Neste caso, terá que apresentar um tempo maior de movimentação cheio ou movimentação vazio.

Pensando em um cenário onde a britagem primária precisa ser alimentada, e uma liberação de frente para perfuração, podemos destinar um grupo de equipamentos para transportar minério e um grupo de equipamentos para movimentação de estéril. Logo, conseguimos liberar a frente de lavra que já está perfurada e pronta para ser carregada com explosivos e detonada. E também uma frente de desenvolvimento para sequência do ciclo básico das operações unitárias, garantindo a alimentação de minério e o desenvolvimento diário.

4.3 PRODUTIVIDADE

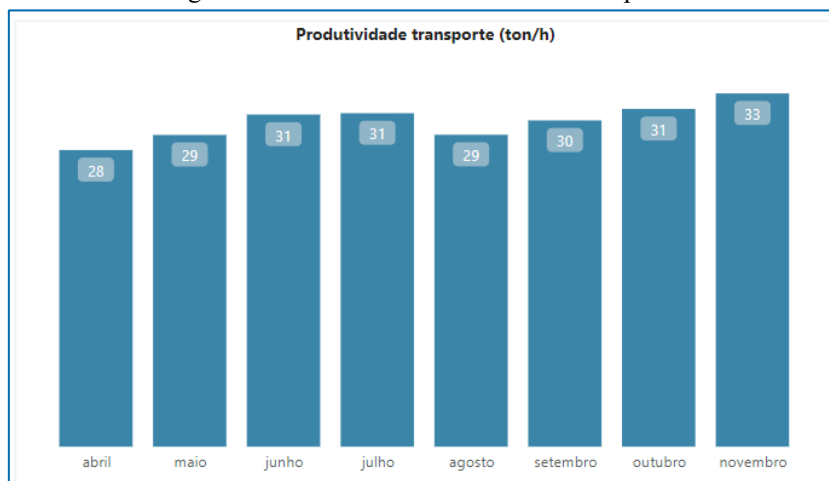
Na Figura 9, observa-se os dados referente a produtividade que ocorre em uma mina subterrânea. Nessa imagem podemos identificar a estabilidade da produtividade da frota de carga, após as análises de dados dos sistemas de despacho e aplicação do cálculo de produtividade, conforme equação 1. Para esse cálculo, deve-se levar em consideração as horas de estado do carregamento dos caminhões. Desta forma, foi obtido as seguintes informações: nos dois primeiros meses não surtiu efeito, devido aos operadores não aderirem trabalhar com o apontamento correto no computador de bordo; no terceiro mês após as devidas orientações tivemos uma queda brusca de aproximadamente 15 (t/h); no quarto mês houve um aumento novamente, mas a partir do quarto mês ocorre a estabilização, ou seja, afirmando que a metodologia realmente funciona, lembrando que não tivemos perdas de produtividade, mas uma assertividade maior, obtendo uma confiabilidade maior dos dados.

Figura 9. Produtividade referente a carga.



Abaixo na Figura 10, temos o ganho de produtividade da frota de caminhões, essa produtividade é resultante da otimização da alocação dos caminhões, destinando a quantidade correta para cada carregadeira, esse resultado é referente a priorização do abastecimento das carregadeiras, ou seja, diminuindo horas improdutivas da frota de transporte.

Figura 10. Produtividade referente ao transporte.



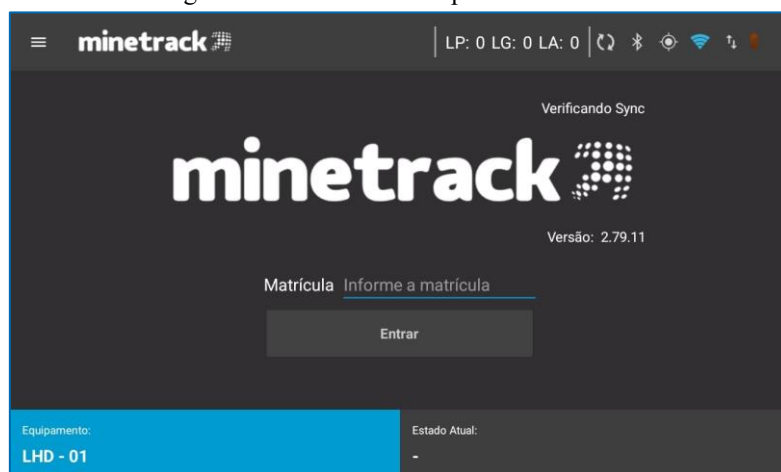
A Figura 10 permite verificar que no mês de abril onde foi iniciada a alocação otimizada, temos uma produtividade de transporte de 28 (t/h). Nos próximos 3,0 meses houve um ganho exponencial, e no mês de agosto identificamos uma queda para 29 (t/h). Essa queda pode ser justificada pela quantidade de frentes disponíveis para limpeza e a distância média de transporte. A partir da análise dessa queda, foi feita uma nova alocação otimizada, e em setembro iniciamos novamente o ganho exponencial de produtividade. Logo, mesmo com algumas oscilações, ocorreu um ganho significativo desde o primeiro mês dos estudos, e nos meses atuais temos um ganho exponencial.

4.4 ABASTECIMENTO DE EQUIPAMENTOS

Na mina subterrânea pesquisada foi identificado que as operações auxiliares de abastecimento e lubrificação, não é priorizada para os equipamentos de carregamento (carregadeiras rebaixadas). Assim ocorre que muitas vezes os caminhões aguardando as carregadeiras para realizar o transporte de material, gerando horas improdutivas.

Após a realização do diálogo diário de segurança (DDS) os operadores iniciam suas atividades nos equipamentos, registrando sua matrícula no computador de bordo (Figura 11), e em seguida realizando as atividades de limpeza, checklist (Figura 12) e abastecimento.

Figure 11. Tela inicial computador de bordo.



Quando o equipamento apresenta alguma desconformidade no checklist, ele é direcionado à oficina para efetuar os reparos necessários, conforme exemplo da Figura 12. Nesta Figura é possível observar diversos itens, onde os itens que estão marcados em verde estão conformes, e os em vermelho apresentam desconformidades.

Figura 12. Checklist.



Para o cenário ideal referente aos equipamentos de carga e transporte, foi determinado a priorização do abastecimento das carregadeiras. Os equipamentos de carregamento devem chegar primeiro na frente de serviço para realizar a conformação da pista, a fim de evitar cortes nos pneus dos caminhões. Ao chegar na frente de serviço, também deve realizar a preparação do material para o carregamento. Assim, quando os caminhões chegarem no ponto de carga, a carregadeira está com a concha cheia, e pronta para efetuar o carregamento. Com isso eliminamos o tempo de aguarde das carregadeiras, e também as horas improdutivas de caminhões, e no final do turno de trabalho é possível obter uma maior produção e produtividade.

5 CONCLUSÃO

Os dados obtidos a partir das análises do sistema de despacho ao longo de alguns meses, confirmaram uma estabilização da produtividade da frota de carga. A melhoria apresentada pela frota de caminhões, representa um ganho exponencial de produtividade, que foi resultante da otimização da alocação dinâmica, comprovando que a utilização do sistema de despacho de forma correta é capaz de obter ganhos operacionais.

Durante o desenvolvimento do trabalho foi possível comprovar que ao priorizar corretamente a etapa do abastecimento e lubrificação das máquinas e equipamentos é possível obter ganhos de produtividade. Esse ganho representa a diminuição de horas improdutivas da frota de caminhões, e implica em um aumento de produção e produtividade de toda frota de carga e transporte.

Por fim, também foi possível associar o aumento da produção a partir da destinação correta da limpeza da frente de lavra, em um cenário onde a limpeza se inicia pelas frentes de serviços, e posteriormente à etapa de desenvolvimento da lavra. Assim, podemos afirmar que o acompanhamento dos Indicadores-Chave de Desempenho (KPIs) e o monitoramento de um sistema de despacho, apresentam uma visão de como os fatores e suas interações influenciam na produtividade de uma mineração subterrânea. Logo, uma avaliação correta dos dados, pode oferecer alternativas de otimização para as operações unitárias em uma subterrânea.

REFERÊNCIAS

- BRITO, L. G. S. **Avaliação da produtividade de um sistema de transporte subterrâneo utilizando LHD.** 1994.
- COSTA, F. P. **Aplicações de técnicas de otimização a problemas de planejamento operacional de lavra em minas a céu aberto.** Dissertação de Mestrado do Programa de Pós- Graduação em Engenharia Mineral da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.
- FERRAZ, P. S. **Análise de overbreak/underbreak e rendimento de desmonte em desenvolvimento de mina subterrânea.** 2022.
- LACERDA, A. et al. **Análise dos dados de ciclo de transporte gerados pelo sistema de despacho para uma mina de cobre.** 2019.
- JÚNIOR, J. A. N. **Avaliação de utilização de uma rede lora para transmissão de dados aplicados a um sistema de minetracking.** 2019.
- OLIVEIRA, A. L. M. **Abordagem prática de indicadores operacionais de mina.** 2018.
- ROSMANINHO, Í. F. **Ciclo de desenvolvimento de aberturas subterrâneas: Estudo de caso Mina Vazante.** 2021.
- SANTOS, J. V. Castro. **Análise e acompanhamento do desempenho dos equipamentos de transporte da mineradora Ferro+ (Mineração com o KPI movimentando cheio/movimentando vazio).** 2021.
- SILVA, R. P. S. et al. Estudo de caso: **Uma análise financeira simplificada entre os métodos de lavra de sublevel stoping e corte e enchimento em uma mina subterrânea de ouro.** 2022.
- SODEP. **Tecnologias para o controle de frotas, c2023.** Página inicial. Disponível em :< <https://sodep.com.br/minetrack>>. Acesso em 14 de janeiro de 2025.
- NUNES, M. A. **Importância do controle de performance dos equipamentos de carga e transporte para o planejamento de mina.** 2021. 37 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mineral, Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

O PAPEL DO PLANEJAMENTO DE CURTO PRAZO NA OPERAÇÃO DE LAVRA EM MINAS A CÉU ABERTO

  10.56238/livrosindi202529-006

Maria Cecília Nogueira Teles

1Bacharel (2019) em Ciência e Tecnologia e Engenheiro de Minas (2024) pela UFVJM, Janaúba, Brasil
E-mail: cecilia.teles@ufvjm.edu.br

Gerson Ferreira da Silva

Engenheiro de Minas (2004) e Mestre (2019) em Engenharia de Minas e Petróleo pela UFCG
Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (2023) pela UFRGS
Professor Adjunto do curso de Engenharia de Minas da UFVJM, Janaúba, Brasil
E-mail: gerson.ferreira@ufvjm.edu.br

RESUMO

A indústria de mineração, voltada para a exploração de recursos minerais finitos e não renováveis, busca constantemente maximizar lucros e reduzir custos. No entanto, essa atividade enfrenta desafios decorrentes da incerteza inerente à natureza dos depósitos minerais. Nesse contexto, o planejamento de lavra emerge como um elemento crucial para o sucesso do empreendimento, permitindo a identificação precoce de problemas e a otimização dos recursos disponíveis. Com o presente trabalho, propõe-se uma revisão dos registros que acompanham a conformidade e a implementação dos planos de lavra de curto prazo em minas a céu aberto. A análise desses registros visa compreender e aprimorar o processo de planejamento de lavra, objetivando melhorias na eficiência operacional e financeira das minas. Os indicadores de aderência e cumprimento da lavra desempenham um papel fundamental na avaliação da eficácia do sistema produtivo na indústria mineradora. Essas métricas são primordiais para identificar áreas de produção que operam abaixo do esperado, o que pode impactar negativamente os custos operacionais. Com este trabalho, destaca-se a importância de uma análise detalhada dos Indicadores Chave de Desempenho (KPIs) na operação de uma mina, evidenciando como a integração de variáveis, a exemplo, disponibilidade física, utilização de equipamentos e controle de horas improdutivas pode otimizar a produtividade. O estudo analisa a eficiência operacional dos caminhões fora de estrada, exemplificando com o modelo CAT 793D, e apresenta estratégias para mitigar impactos ambientais e operacionais. Por meio da análise comparativa entre o programado e o realizado, este trabalho oferece percepções valiosas para a melhoria contínua das operações de mineração, contribuindo para uma gestão mais sustentável e lucrativa.

Palavras-chave: Planejamento de lavra, Eficiência operacional, Otimização de recursos, Aderência e cumprimento.

1 INTRODUÇÃO

A atividade de mineração é definida pela exploração de recursos minerais que são limitados e não renováveis. Assim como em qualquer indústria, seus principais objetivos incluem o aumento dos lucros e a redução dos custos. Além disso, a mineração é caracterizada por exigir altos investimentos e despesas contínuas para manter um projeto em funcionamento. No entanto, há uma série de incertezas inerentes a essa atividade, uma vez que diversos fatores podem influenciar na viabilidade

e na durabilidade do empreendimento, especialmente devido à natureza finita dos depósitos minerais (Campos, 2017).

Portanto, em consonância com essa evolução, o planejamento de lavra assume um papel cada vez mais crucial. As programações de atividades, alinhadas com a produção projetada, tornam-se fundamentais para o êxito do empreendimento. Essa abordagem permite a identificação antecipada de problemas e outras eventualidades, possibilitando a mitigação ou a prevenção posteriormente (BORGES, 2013). Além disso, o objetivo do planejamento de lavra é otimizar o aproveitamento máximo dos recursos disponíveis, tanto financeira quanto tecnicamente, visando alcançar o lucro ótimo por meio de planos de lavra estratégicos (Campos, 2017).

Por se tratar de uma simulação da produção de uma mina, diversas estratégias podem ser adotadas para otimizar o processo, tais como estabilizar variáveis para maximizar a eficiência dos equipamentos de carga e transporte, elaborar cronogramas para a disposição adequada de estéril e minimizar os impactos ambientais, especialmente em situações de rejeito seco. Um aspecto importante é o controle da qualidade do minério, dada sua significância (Chimuco, 2010).

Segundo Câmara et al. (2014), uma das funções primordiais do planejamento de lavra é a tomada de decisão sobre onde efetuar a lavra e onde dispor o estéril. Por sua vez, Rodovalho (2013) enfatiza que o planejamento deve contemplar a definição do ritmo de produção, levando em conta uma variedade de variáveis, como exemplo, a utilização e a disponibilidade física dos equipamentos, a distância média de transporte, os tempos operacionais (carregamento, basculamento, manobra), os padrões de acesso, entre outros.

Para uma organização eficaz da simulação, é essencial que o planejamento de lavra seja estruturado em intervalos de tempo distintos. Frequentemente, essa divisão é realizada em três períodos: longo, médio e curto prazo (Curi, 2014). O planejamento de lavra de longo prazo abrange estudos relacionados à configuração final da cava, planejamento de barragens e sumps (reservatórios) permanentes, disposição adequada do estéril, exploração de novos produtos e implementação de projetos de acessos permanentes.

O planejamento de longo prazo visa estabelecer as reservas minerais e desenvolver um sequenciamento de lavra até a configuração final da cava, buscando maximizar tanto o retorno financeiro quanto a vida útil da mina (Souza, 2013). De acordo com Silva (2008), o plano de lavra de longo prazo é uma estratégia que considera uma variedade de fatores, tais como questões ambientais, de segurança e operacionais. Além disso, é uma atividade dinâmica que requer revisões periódicas para incorporar novas informações, por exemplo, mudanças econômicas, avanços geológicos e inovações tecnológicas.

O planejamento de médio prazo assume a responsabilidade de garantir a continuidade do processo de lavra, visando à estabilidade de variáveis técnicas e econômicas essenciais nas operações da mina (IBRAM, 1996). Para alcançar esse objetivo, o planejamento de médio prazo desdobra os planos de longo prazo em planos anuais, geralmente abrangendo os próximos cinco anos (Souza, 2013).

E o planejamento de curto prazo se concentra nos aspectos operacionais, partindo dos planos de médio prazo e se desdobrando em intervalos anuais, semestrais, trimestrais, mensais, semanais e, em alguns casos, diários (Souza, 2013; Rodovalho, 2013). Dessa forma, é direcionado para períodos menores, visando garantir a conformidade do material a ser extraído, o cumprimento das metas de produção e a liberação do minério (Ximenes, 2018). Suas responsabilidades incluem a programação das pilhas de minério bruto (ROM), a disposição do estéril, o controle da qualidade dos produtos e das pilhas de minério bruto, a atualização topográfica da mina, a análise de acessos temporários ou secundários, a amostragem da frente de lavra, a quantificação dos estoques ao final de cada mês, entre outras atividades (Chimuco, 2010).

Para auxiliar nas atividades de planejamento de lavra, diversos softwares são amplamente utilizados em nível operacional, possibilitando ajustes no plano de lavra visando à maior precisão (Silva, 2014). No contexto desta pesquisa, será enfatizada a análise dos volumes de materiais movimentados em uma mina de ouro por meio da avaliação de indicadores de performance, permitindo uma análise dos índices de aderência e cumprimento dos planos de lavra de curto prazo.

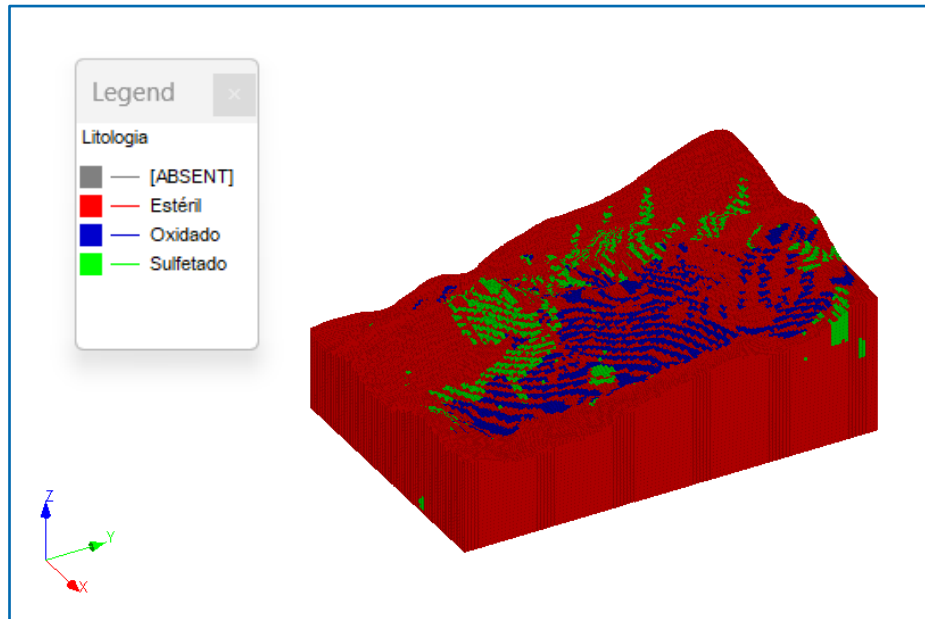
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 MODELO DE BLOCOS

Conforme mencionado por Amaral (2008), o modelo de blocos é uma representação tridimensional de uma mina, composto por milhares de blocos. Hustrulid e Kuchta (1994) destacam a importância da aplicação de técnicas computacionais na mineração, as quais ajudam a qualificar e quantificar o material presente na reserva.

O modelo de blocos serve como fundamento para os projetos de planejamento de lavra, dividindo o depósito mineral e o material estéril em uma série de blocos organizados de maneira sistemática no espaço. Na Figura 1, ilustra-se um modelo de blocos conceitual, mostrando como esses blocos são arranjados dentro de uma malha regular.

Figura 1. Modelo de Blocos.



Fonte: Autoria própria.

De acordo com Peroni (2002), a delimitação dos limites do corpo mineral e a avaliação da quantidade e da qualidade dos parâmetros relevantes constituem grandes desafios enfrentados por geólogos e engenheiros de minas. O modelo de blocos emerge como um dos métodos empregados para representar esses limites, subdividindo o corpo mineral em um conjunto de pequenos blocos.

Dentro do modelo de blocos, diversos parâmetros técnicos de um depósito são considerados, incluindo teores estimados, coordenadas, densidades, umidade, recuperação, litologia e informações sobre interpretações geológicas dos testemunhos de sondagem. Ao adicionar essas informações a parâmetros econômicos, tais como preço de venda do produto, custos de lavra e beneficiamento, torna-se viável determinar o valor de cada bloco por meio da aplicação de uma função benefício (Rumbaugh, 1991).

Essa função atribui a cada bloco do modelo um valor líquido, que pode ser positivo ou negativo, levando em conta as receitas e deduzindo os custos associados. Consequentemente, o modelo avaliado economicamente serve como alicerce para os métodos computacionais ou algoritmos de otimização de cava a céu aberto. E, então, o planejamento de lavra é iniciado mediante o modelo de blocos e determina-se se um bloco deve ser lavrado ou não, quando deve ser lavrado e quando deve ser enviado para o processamento de acordo com os parâmetros de interesse (Saydam & Yalcim, 2002).

Portanto, a assertividade do modelo de blocos é essencial para o planejamento de qualidade do empreendimento mineiro, principalmente para a determinação dos limites de cava ótima e do sequenciamento da lavra, pois os parâmetros de teores, quantidades e qualidade do material definidos nos modelos geológicos são os principais fatores para a determinação da cava final (Amaral, 2008).

2.2 PLANEJAMENTO DE LAVRA

Segundo Hustrulid & Kuchta (1995), o planejamento é a etapa de um projeto dedicada a avaliar a viabilidade econômica de um depósito mineral. Essa fase culmina na elaboração de um relatório de viabilidade, que determina se o desenvolvimento e a exploração do corpo mineral serão realizados. Se a decisão for positiva, o projeto avança para as fases de desenvolvimento e implementação, extração e produção e, por fim, o fechamento da mina.

O planejamento de longo prazo na mineração a céu aberto abrange a formulação de estratégias de lavra que buscam maximizar o Valor Presente Líquido (VPL) do empreendimento. Isso inclui a consideração de fatores, como exemplo, o sequenciamento da lavra, a otimização dos limites da cava e a realização de estudos de viabilidade econômica (ALVES, 2000).

Já o planejamento de médio prazo atua como uma ponte entre os planos de longo e curto prazo. Ele abrange a elaboração de planos operacionais detalhados para um período de um a cinco anos, com ênfase na coordenação das atividades de mineração e processamento, bem como na adaptação das operações às mudanças nas condições do mercado e da mina (MIRANDA, 2012).

Por sua vez, o planejamento de curto prazo envolve a criação de planos operacionais detalhados para períodos de dias, semanas ou meses. Esse tipo de planejamento é fundamental para a gestão diária das operações de lavra e processamento, assegurando o cumprimento dos objetivos de produção e qualidade definidos nos planos de médio e longo prazo (SILVA, 2018).

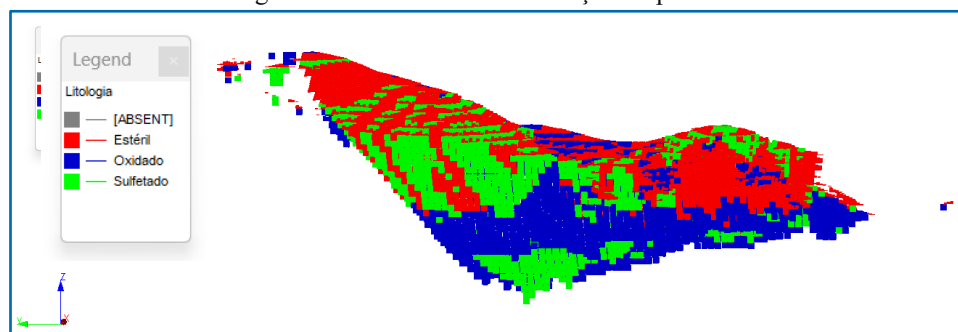
Portanto, o planejamento de curto prazo é essencial para acompanhar e analisar os Indicadores Chave de Desempenho (KPIs) na operação de lavra, os quais possibilitam a rápida identificação de desvios em relação aos objetivos estabelecidos e a adoção imediata de ações corretivas, assegurando a eficiência operacional e a otimização dos recursos (SOUZA, 2015) ou seja, a integração do planejamento de curto prazo com os KPIs é vital para a eficiência das operações em minas a céu aberto. Essa prática permite o monitoramento contínuo de métricas de desempenho, incluindo produtividade, uso de equipamentos e custos operacionais, facilitando uma gestão mais ágil e precisa das atividades de lavra (FERREIRA, 2017).

2.2.1 Planejamento de lavra de longo prazo

O objetivo do planejamento de longo prazo é definir os limites que podem ser lavrados do depósito e determinar as reservas que são técnica, econômica e ambientalmente viáveis para a extração. Essa etapa resulta na configuração da cava final, na determinação da extensão dos limites de lavra e na interação com limites legais, minerários e superficiários, além de estabelecer a localização das infraestruturas de superfície (ALVES, 2000).

Na Figura 2, tem-se a representação da cava final ou *ultimate pit* após terem sido aplicadas aos blocos todas as premissas consideradas essenciais para a delimitação daquele corpo mineral de maneira a maximizar o lucro do empreendimento minerário.

Figura 2. Cava ótima com definição do pit final.



Fonte: Autoria própria.

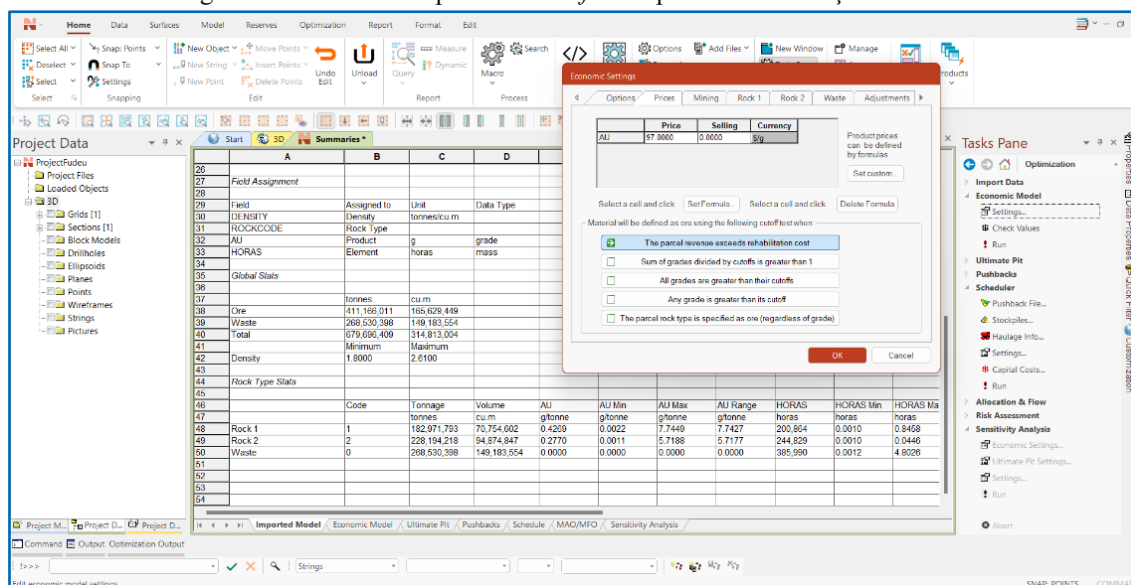
O planejamento de longo prazo deve criar uma estratégia de lavra e operação que maximize o retorno financeiro para os investidores, minimize os riscos e prolongue a vida útil da mina (MIRANDA, 2012).

Todos os algoritmos de otimização dependem de um modelo de blocos em que a cada bloco é atribuído um benefício líquido (positivo ou negativo). Esse benefício, por ser função do preço do minério e dos custos de processo, torna-se desatualizado ao longo do tempo devido a mudanças nos preços ou custos. Portanto, a cava final, apesar do nome, não deve ser vista como um estudo definitivo, mas, sim, como um projeto dinâmico influenciado pelo conhecimento geológico, pelas alterações em parâmetros geotécnicos, pelas variações nos parâmetros econômicos, além de aspectos tecnológicos e ambientais (CANDIDO, 2012).

A forma e o tamanho da reserva de minério, juntamente com a quantidade de estéril a ser removido, são determinados pela cava final (WRIGHT, 1990). Assim, qualquer mudança nos fatores econômicos e/ou nas restrições de produção pode modificar significativamente o tamanho e a forma da cava. Por exemplo, um aumento no preço de venda do produto poderia viabilizar a expansão da cava, desde que os custos permanecessem constantes (HUSTRULID & KUCHTA, 1995).

É possível observar, na Figura 3, a representação de uma guia do *software* Datamine em que é feito o modelamento econômico de um depósito mineral.

Figura 3. Parâmetros imputados no *software* para a maximização do lucro.



Fonte: Autoria própria.

2.2.2 Planejamento de lavra de médio prazo

O planejamento de médio prazo, por sua vez, tem objetivos semelhantes aos do planejamento de longo prazo, mas em uma escala temporal menor. Ele divide os avanços de lavra dentro dos limites estratégicos previamente definidos em etapas menores. Geralmente, esse planejamento é aplicado a projetos em andamento e serve como diretriz para um período de um a cinco anos de operação (PEREIRA, 2015).

Neste, é possível incluir a definição de metas específicas considerando aspectos, tais como a otimização do sequenciamento de lavra, a maximização da utilização de equipamentos e a gestão eficiente dos recursos humanos. Além disso, abrange a análise de viabilidade econômica de diferentes cenários de produção, levando em conta os custos operacionais e as projeções de preço dos minerais (CHAVES *et al.*, 2019).

2.2.3 Planejamento de lavra de curto prazo

Pode-se observar que o plano de lavra de curto prazo é uma consequência do detalhamento dos planos de lavra de longo prazo; a principal diferença entre eles é que o plano de curto prazo requer um nível de detalhamento mais específico das atividades, visando reduzir as incertezas associadas a ele. Além disso, o planejamento de curto prazo pode ser realizado de várias maneiras. E este estudo abordará o plano de lavra mensal, semanal e diário.

2.2.3.1 Plano de lavra mensal

Após a recepção do plano de lavra anual de uma mina, é comum que a equipe de planejamento de curto prazo desenvolva o plano de lavra mensal o qual tem como objetivo principal sequenciar as operações de lavra, visando garantir uma maior precisão na execução do plano anual. Além disso, o plano mensal desempenha o papel de definir os avanços no minério e no estéril, assegurando uma proporção adequada entre eles para alcançar as metas operacionais (SILVA, 2019).

O planejamento de lavra mensal constitui um documento minucioso que delineia as atividades operacionais a serem executadas em um dado mês. Compreende a programação das frentes de lavra, a alocação de recursos, como exemplo, equipamentos e mão de obra, e estabelece metas de produção e qualidade a serem atingidas (SILVA, 2019).

A relação estéril/minério pode ser categorizada como global, instantânea ou operacional (BAKHTAVAR e SHAHRIAR, 2007). Essas classificações permitem o acompanhamento de índices operacionais, a exemplo, aderência ao plano de lavra e disponibilidade de equipamentos, para determinar se o sequenciamento da lavra está alinhado com o plano de ação (CURI, 2014).

2.2.3.2 Plano de lavra semanal

O plano de lavra semanal desempenha um papel fundamental ao sequenciar os avanços delineados no plano mensal em intervalos semanais, com o objetivo de garantir uma alimentação contínua à usina. Este planejamento é caracterizado por uma riqueza de detalhes e diretrizes, pois suas saídas orientam as operações dos equipamentos de produção e da infraestrutura da mina. Ele apresenta os polígonos correspondentes aos avanços da mina para a lavra de uma semana específica (SILVA, 2014).

O planejamento semanal não é adotado universalmente em todas as minas, mas em alguns casos, sim, como exemplo, na mina em questão deste trabalho. A utilização do planejamento semanal é uma estratégia empregada no planejamento de curto prazo para uma divisão mais detalhada do plano mensal. Dessa forma, com os resultados de cada semana de operação, é possível avaliar se as decisões tomadas estão alinhadas e em conformidade com o plano mensal estabelecido.

O plano semanal se inicia no primeiro dia da semana com uma reunião que envolve os responsáveis pelas áreas de planejamento de curto prazo, operações, infraestrutura e geologia. Durante essa reunião, são apresentados os locais onde a lavra será realizada, garantindo que todos os índices planejados sejam atingidos. Ao final da semana, é realizada uma nova reunião para apresentar os resultados obtidos, incluindo os índices operacionais, a aderência ao plano de lavra e o cumprimento das metas estabelecidas. Com base nesses resultados, o planejamento de curto prazo realiza adaptações para o próximo período, corrigindo eventuais erros do período anterior e delineando o sequenciamento da lavra para o próximo período (SILVA, 2014).

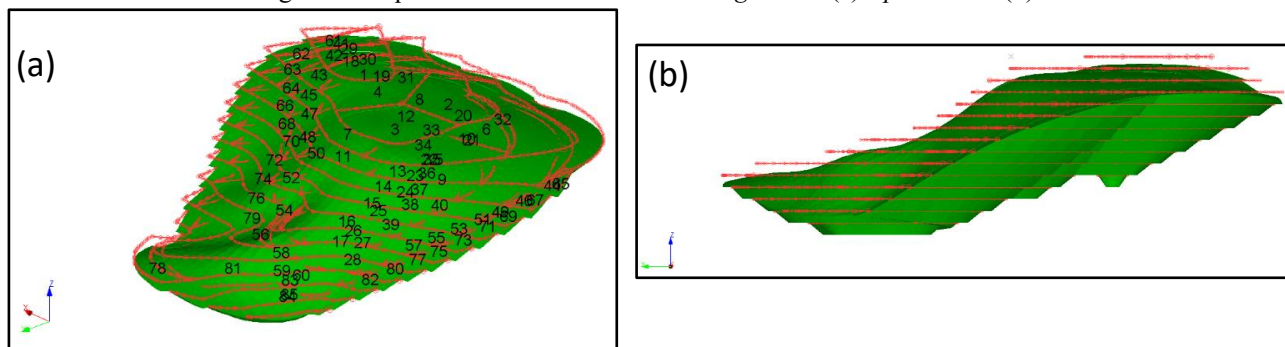
2.3 SEQUENCIAMENTO DE LAVRA

Segundo Halatchev (2002), o sequenciamento de lavra está diretamente relacionado a dois fatores tecnológicos principais: espaço e tempo. Após definir a cava final, o próximo passo é determinar a sequência adequada para a extração dos blocos, estabelecendo como a mina será desenvolvida. Esse sequenciamento de lavra possibilita estipular a vida útil da mina com base na taxa de produção necessária. Embora a cava ideal ofereça a máxima lucratividade, ela não é extraída de uma só vez. Assim, há diversas maneiras de realizar o sequenciamento, utilizando a cava final obtida na otimização.

Técnicas de pesquisa operacional são amplamente aplicadas para encontrar rapidamente a sequência ótima de extração conforme as premissas estabelecidas. Durante o sequenciamento de lavra, a cava final é subdividida em vários avanços operacionais (*pushbacks*), que são, posteriormente, divididos em blocos menores (*Mining Blocks*) (MORALES *et al.* 2009).

Na fase de sequenciamento, é planejada a estratégia de extração, determinando se a produção de minério, os teores e a Relação Estéril Minério (REM) serão crescentes, decrescentes ou constantes ao longo dos anos de operação (HALATCHEV, 2002). Na Figura 4a e 4b, é possível observar o sequenciamento.

Figura 4: Sequenciamento de lavra em *mining blocks* (a) e *pushbacks* (b).



Fonte: Autoria própria.

2.4 SOFTWARES

O emprego de *softwares* na mineração tornou-se primordial para otimizar diversas fases do processo minerário. Ferramentas de modelagem geológica permitem a criação de modelos tridimensionais detalhados dos depósitos minerais, facilitando a identificação de áreas de alto valor econômico. *Softwares*, tais como Surpac e Vulcan, são amplamente utilizados para esse fim, proporcionando maior precisão e eficiência na exploração mineral (JORGE *et al.*, 2015).

Além da modelagem geológica, os *softwares* de planejamento de mina são vitais para desenvolver planos de lavra eficientes e economicamente viáveis. Programas, como exemplo, Studio NPVS da Datamine, são utilizados na otimização de cavas, permitindo a maximização do Valor Presente Líquido (VPL) do projeto mineral. Esses *softwares* consideram diversos parâmetros, a exemplo, custos operacionais, preço do minério e restrições ambientais, para gerar cenários de lavra que otimizam a rentabilidade da mina (CLEMENTE & ALMEIDA, 2017).

A integração de *softwares* de simulação e controle de produção tem transformado a operação de minas. Ferramentas de gestão integrada, por exemplo o Minestar, permitem o monitoramento e a otimização do desempenho das frotas de perfuração, carregamento, transporte e infraestrutura do empreendimento mineral (SANTOS & OLIVEIRA, 2018).

A aplicação de *softwares* de análise de dados e inteligência artificial está se tornando cada vez mais comum na mineração moderna. Esses sistemas processam grandes volumes de dados geológicos e operacionais, identificando padrões e tendências que melhoram a eficiência e segurança das operações. Programas, tais como Datamine, Micromine e Deswik, oferecem ferramentas avançadas de análise e visualização de dados, auxiliando na tomada de decisões mais informadas e precisas (PEREIRA & MARTINS, 2019).

2.5 RECONCiliaÇÃO

Atualmente, a maioria das empresas de mineração realiza atividades de reconciliação, que envolvem a comparação entre estimativas e medições. Em outras palavras, comparam-se os teores de minério estimados pelos modelos da jazida com os teores produzidos na usina de beneficiamento. Conforme Chierregati *et al.* (2008), grandes discrepâncias entre esses valores são comuns em várias minas de ouro e metais básicos ao redor do mundo, o que torna necessária a adoção de estratégias para minimizar esse problema.

A reconciliação é realizada por meio de várias etapas, que incluem a coleta de dados durante as operações de lavra e processamento, a análise dessas informações e a comparação com os modelos geológicos iniciais. A precisão na coleta de amostras e na medição dos teores de minério é determinante para este processo. Estudos indicam que pequenas melhorias na amostragem podem resultar em grandes melhorias nos resultados operacionais. Comparar as diferenças entre a produção prevista e a produção real permite corrigir imprecisões e otimizar métodos e equipamentos de amostragem (PETERSEN & DOMINY, 2013).

Além de melhorar a precisão das estimativas futuras, a reconciliação é crucial para a gestão de recursos e a tomada de decisões informadas. Avaliar os teores lavrados e a execução dos planos de lavra são ações reativas que promovem a melhoria contínua do processo. A comparação constante entre os dados estimados e os dados reais permite ajustes rápidos e eficazes, garantindo a aderência aos planos e a otimização dos resultados da mineração (SMITH *et al.*, 2014).

2.6 INDICADORES CHAVE DE DESEMPENHO NA MINERAÇÃO - KPIS

Os KPIs (Indicadores Chave de Desempenho) são instrumentos fundamentais para medir o desempenho das operações de lavra, e o planejamento de curto prazo é importante para o monitoramento e ajuste contínuo desses indicadores. A ligação entre um planejamento detalhado e os KPIs permite identificar problemas e tomar decisões informadas para aumentar a produtividade e a eficiência operacional (COSTA, 2018).

A funcionalidade avançada do sistema Minestar em análise de dados permite que os gerentes de mina visualizem tendências e padrões nos KPIs ao longo do tempo. Essa análise histórica é fundamental para a tomada de decisões estratégicas, permitindo que as operações de mineração se ajustem proativamente às mudanças nas condições operacionais e de mercado. Ao fornecer uma plataforma robusta para a coleta e análise de dados, o Minestar apoia a melhoria contínua e a inovação nas práticas de mineração (THOMPSON & WHITE, 2021).

3 MATERIAL E MÉTODOS

P Na metodologia deste trabalho, será realizada uma comparação detalhada dos dados gerados pelo sistema Minestar com os dados planejados para a operação da mina em questão. Essa comparação permitirá avaliar a precisão e a eficiência das estimativas feitas inicialmente, identificando possíveis discrepâncias e analisando suas causas. Mediante essa análise, buscaremos entender melhor o alinhamento entre o planejamento e a execução das operações, bem como identificar áreas de melhoria para otimizar a produtividade e a eficiência operacional da mina.

3.1 ANÁLISE DE KPIS COMPARANDO COM O PLANEJAMENTO SEMANAL

A metodologia adotada para analisar os KPIs de uma mina e compará-los com o planejamento de curto prazo, dia a dia, envolve um processo sistemático de coleta, análise e interpretação de dados. Primeiramente, são identificados os principais KPIs relacionados às operações de lavra e processamento, tais como produtividade, eficiência de equipamentos, consumo de combustível, custos operacionais, entre outros relevantes para a eficiência operacional.

Em seguida, os dados são coletados diariamente do sistema de monitoramento Minestar, que fornece informações em tempo real sobre a produção, utilização de equipamentos e condições operacionais. Esses dados são comparados com as metas e planos estabelecidos para o curto prazo, que geralmente incluem planos diários de produção, sequenciamento de lavra, alocação de recursos e cronogramas de manutenção.

A análise dos KPIs é realizada por meio de ferramentas estatísticas e de visualização de dados, permitindo identificar desvios entre o planejado e o realizado. Caso haja discrepâncias significativas, são investigadas as causas subjacentes, que podem incluir problemas técnicos, condições climáticas adversas, disponibilidade de mão de obra ou materiais, controles ambientais, entre outros fatores.

Para garantir a precisão da análise, são utilizados métodos de reconciliação de dados, comparando as medições feitas no campo com as estimativas e previsões feitas no planejamento. Essa abordagem não apenas ajuda a corrigir imprecisões nos modelos de planejamento, mas também possibilita ajustes rápidos e informados nas estratégias operacionais para otimizar o desempenho e maximizar a eficiência da mina.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PLANEJAMENTO DE LAVRA DE CURTO PRAZO

A empresa cujas características foram consideradas é de grande porte, com o setor de planejamento de mina e operação bem desenvolvido. Além desses setores, o da manutenção também é desenvolvido uma vez que realiza a manutenção de equipamentos de grande porte utilizados para transporte na mineração. Esses equipamentos são caminhões, conhecidos como “caminhão fora de estrada”, cuja carga útil pode variar entre 50 a 300 toneladas. Atualmente essa frota de caminhões é composta por 38 unidades do modelo CAT 793D da empresa Caterpillar.

Na Figura 5, retrata-se como a planilha é alimentada e analisada pelo planejamento de curto prazo, levando em consideração todo o cenário programado para aquele período e as adaptações que ocorrem por intercorrências do dia a dia.

Figura 5. Planilha com dados dos KPIs de equipamento de transporte da semana.

CAT 793											
Período	Disponibilidade Física	Utilização	Equipamentos Disponíveis	Produtividade Efetiva	Tempo de Ciclo	DMT	Movimentando Cheio	Movimentando Vazio	Velocidade Cheio	Velocidade Vazio	Velocidade Média
	%	%	#		min	m	min	min	km/h	km/h	km/h
08/09	90%	87.9%	32	454	30.04	3,144	12.08	9.80	15.6	19.3	17.2
09/09	90%	87.8%	32	547	24.92	2,658	8.82	8.25	18.1	19.3	18.7
10/09	90%	88.5%	32	553	24.64	2,473	8.77	7.98	16.9	18.6	17.7
11/09	86%	88.4%	30	605	22.52	2,216	8.07	7.34	16.5	18.1	17.3
12/09	86%	88.3%	30	521	26.14	2,937	9.60	9.09	18.4	19.4	18.9
13/09	86%	87.5%	30	493	27.62	3,014	10.71	9.32	16.9	19.4	18.1
14/09	86%	87.6%	30	533	25.54	2,616	10.10	8.22	15.5	19.1	17.1
Total	88%	88.0%	31	533	25.74	2,699	9.63	8.51	16.9	19.0	17.9

Período	Fila no Carregamento	Fila no Basculamento	Aguardando Carregamento	Manobra de Carregamento	Manobra de Basculamento	Basculamento	Tempo de Carregamento	Carga Média	Produção
	min	min	min	min	min	min	min	t	t
08/09	2.40	0.51	0.20	0.80	0.80	0.82	2.63	227	301,563
09/09	2.40	0.42	0.21	0.80	0.80	0.83	2.39	227	363,054
10/09	2.40	0.32	0.20	0.80	0.80	0.89	2.49	227	369,868
11/09	2.40	0.34	0.21	0.80	0.80	0.63	1.93	227	386,327
12/09	2.40	0.16	0.16	0.80	0.80	0.84	2.29	227	332,499
13/09	2.40	0.34	0.21	0.80	0.80	0.88	2.16	227	311,749
14/09	2.40	0.38	0.19	0.80	0.80	0.76	1.90	227	337,547
Total	2.40	0.35	0.20	0.80	0.80	0.80	2.25	227	2,402,605

Fonte: Autoria própria.

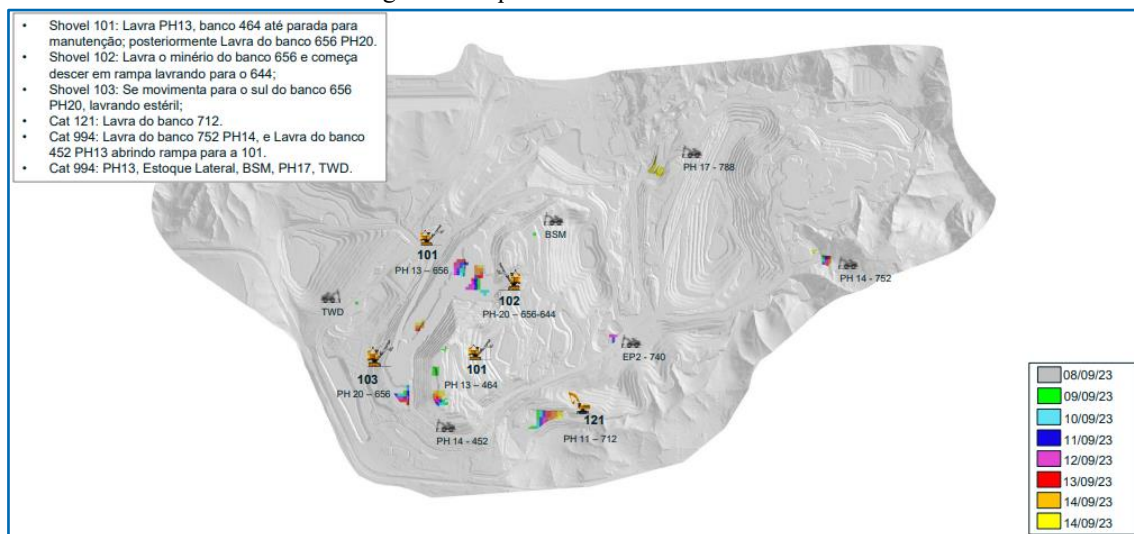
Por ser uma mina que opera muito próximo da comunidade, há muitos controles operacionais que devem estar dentro do limite estabelecido pela legislação ambiental e o que foi acordado com a comunidade. Então, é possível perceber, nos planos semanais, que as metas diárias respeitam as intercorrências programadas, por exemplo, nos períodos de seca há uma maior percepção dos ruídos das máquinas que operam em um raio de 200 metros da comunidade.

Logo, em alguns dias, há um maior tempo de parada dos equipamentos de carga e transporte para conter o ruído e poeira. Por isso, análises de utilização e disponibilidade dos equipamentos são variáveis de alto controle nesta mina em questão já que os tempos de parada para controle de ruído e poeira impactam negativamente a produção diária.

4.2 SEQUENCIAMENTO DE LAVRA

Na Figura 6, tem-se a sequência de lavra planejada para a semana em questão que é tratada no Plano de Lavra Semanal (PLS) e evidencia-se em qual fase cada máquina irá operar, se há manutenção em alguma máquina, o trajeto que ela irá percorrer e no sentido de qual banco.

Figura 6. Sequência de lavra da semana.



Fonte: Autoria própria.

Por intermédio do sequenciamento é possível prever impactos nos KPIs daquela semana, por exemplo, quando há movimentação de cabo da máquina escavadeira (Shovel – 7495) para outro banco, significa que ela não irá operar durante as 24 horas do dia e impactará a produção diária.

Para tanto, o calendário de manutenção com todas as paradas por máquinas programadas deve estar sempre em concordância com o executado na operação e com o planejado para a melhor previsibilidade do cenário. As horas de manutenção são parâmetros que influenciam diretamente nos indicadores de disponibilidade física, sendo importante quando se quer analisar o comportamento desse indicador e, conseqüentemente, o comportamento do rendimento operacional.

Na Figura 7, é possível evidenciar como é feito um calendário de manutenção dos equipamentos com o total de horas de manutenção bem como os percentuais de manutenções corretivas e preventivas e, automaticamente, planeja-se o impacto que pode ocasionar na produção da mina. Assim, quando a análise dos indicadores é feita, pode-se direcionar precisamente qual foi a variável que mais impactou, o motivo e, portanto, qual o melhor plano de ação para corrigir o erro.

Figura 7. Exemplo de um calendário de manutenção por determinado período.

	Semana36			Semana37						
	Sex	Sáb	Dom	Seg	Ter	Qua	Qui	Sex	Sáb	Dom
	08/set	09/set	10/set	11/set	12/set	13/set	14/set	15/set	16/set	17/set
793 CAT	Compensação			209 (23h)	209 (24h)	221 (20h)	221 (24h)	221 (24h)		
	Compensação			234 (23h)	234 (24h)	234 (24h)	207 (18h)	205 (18h)		
	Compensação				201 (18h)		224 (18h)	219 (18h)		
777 CAT	891 (24h)	891 (24h)	891 (24h)	891 (24h)	891 (24h)	891 (24h)	891 (24h)	891 (24h)	891 (24h)	891 (24h)
785 CAT	Compensação									
994 CAT	Compensação									
992 CAT	Compensação						111(18h)	111(23h)		
6040 CAT	Compensação			121(18h)						
	Compensação									
834/854 CAT	Compensação			553(18h)	553(24h)	553(24h)	553(24h)	553(24h)	553(24h)	553(24h)
	Compensação									
7495 CAT	Compensação				101 (12h)					
	Compensação									
320 (APOIO)	Compensação					103 (12h)				
DE710	Compensação									
777 CAT	Compensação				702 (18h)					
DI1 CAT	Compensação			510 (18h)		511 (18h)	511 (24h)	511 (24h)	511 (23h)	
D8/6 CAT	Compensação									
349/320/336/966/416E	Compensação									
	Compensação									
	Compensação									
16M/24M CAT	Compensação			605 (18h)	602 (18h)	602 (24h)	602 (23h)	611 (18h)		
	Compensação									
924 / CASE / JCB / Forza	Compensação				812 (18h)	812 (24h)	812 (23h)	838 (18h)		
	Compensação					414 (18h)				
FLEX ROC D65	Compensação						342(18h)			
POWER ROC T50	Compensação									
DM45/50	Compensação									
	Compensação									
PV 271	315(23h)		314(4h)	314(24h)	314(24h)	314(23h)				
	Compensação						311(4h)	312(4h)		

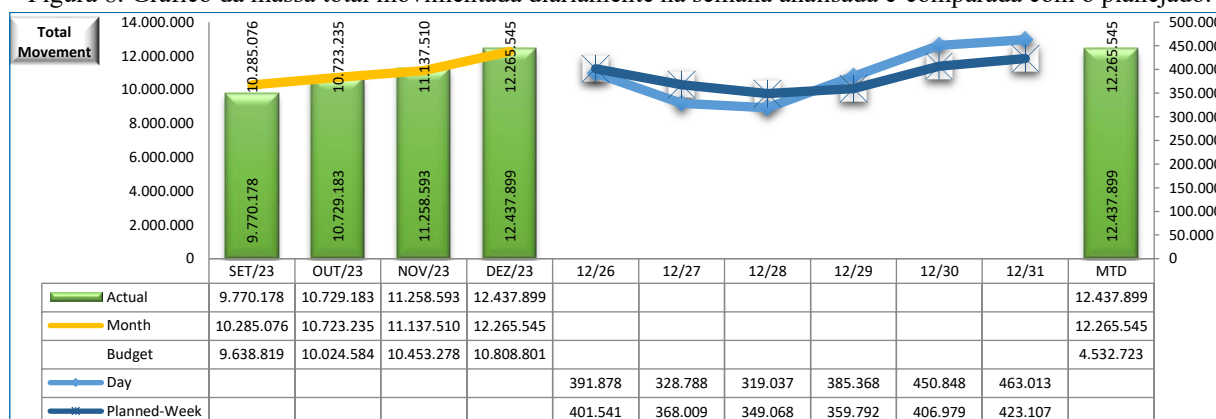
Fonte: Autoria própria.

Como pode ser observado, durante todos os dias, o número de horas de manutenções preventivas (já programadas) ocorre em máquinas diferentes para evitar as manutenções corretivas. Quando comparadas, a manutenção corretiva tem maior impacto financeiro em relação às preventivas, pois aquela torna o equipamento indisponível de maneira repentina, sem que a parada tenha sido planejada, impactando diretamente na produtividade dele.

4.3 INDICADORES CHAVE DE DESEMPENHO – KPIS

Nas Figuras 8 a 13, são evidenciados os Indicadores Chave de Desempenho (KPIs) que são analisados diariamente pela operação de mina, pois foi comprovado que o seu controle impacta diretamente nos ganhos produtivos. E, conseqüentemente, as variáveis que influenciam esses indicadores são altamente controladas para uma melhor performance da frota.

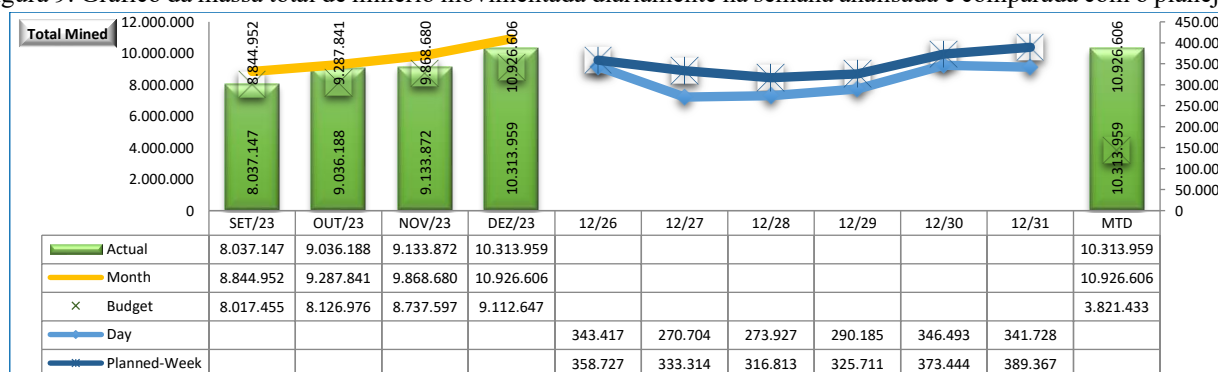
Figura 8. Gráfico da massa total movimentada diariamente na semana analisada e comparada com o planejado.



Fonte: Autoria própria.

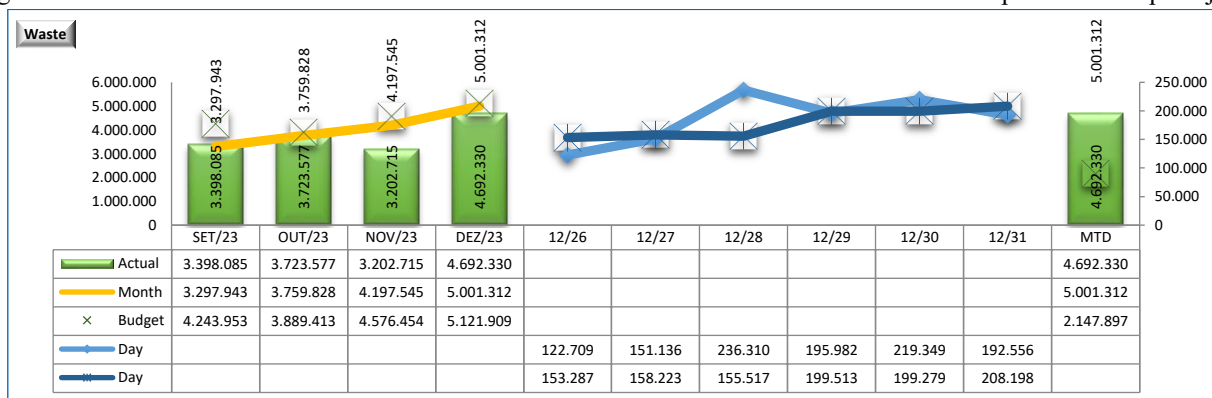
Mediante o gráfico da massa total movimentada, é possível analisar a quantidade de material movido diariamente. Uma vez que esse gráfico evidencia toda a massa que foi movimentada, por meio dele observa-se o desempenho de equipamentos, tais como caminhões e escavadeiras. Nesse gráfico, podem-se incluir informações detalhadas sobre o volume de minério e estéril (material sem valor econômico) retirados da mina, e é essencial para monitorar a produtividade e eficiência das operações de mineração. Neste estudo de caso, os gráficos de movimentação do minério e estéril são plotados individualmente e estão exibidos abaixo.

Figura 9. Gráfico da massa total de minério movimentada diariamente na semana analisada e comparada com o planejado.



Fonte: Autoria própria.

Figura 10. Gráfico da massa total de estéril movimentada diariamente na semana analisada e comparada com o planejado.

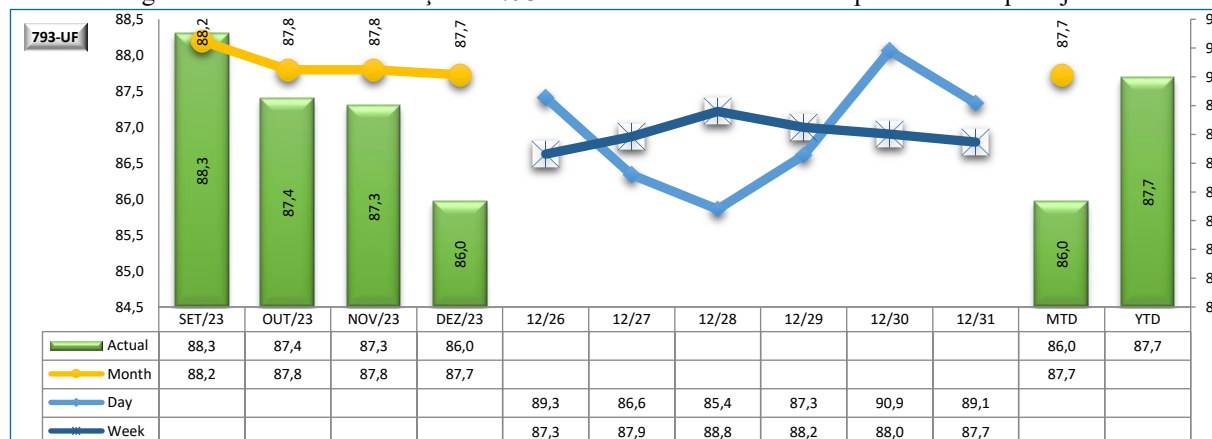


Fonte: Autoria própria.

Ainda, utilizamos o gráfico de utilização do caminhão fora de estrada, modelo 793-D da Caterpillar, que serve para analisar vários aspectos críticos da operação e eficiência do equipamento, pois mostra quanto tempo o caminhão esteve em operação com o tempo total disponível (disponibilidade física). Ou seja, consegue-se também analisar a produtividade uma vez que tem-se a carga transportada, quantidade de material em toneladas, no determinado período em que o caminhão operou. Portanto, as variáveis de utilização, eficiência e produtividade do caminhão são essenciais para gerenciar eficientemente a frota de caminhões, garantindo que os equipamentos sejam usados de maneira otimizada, os custos operacionais sejam controlados e a segurança seja mantida.

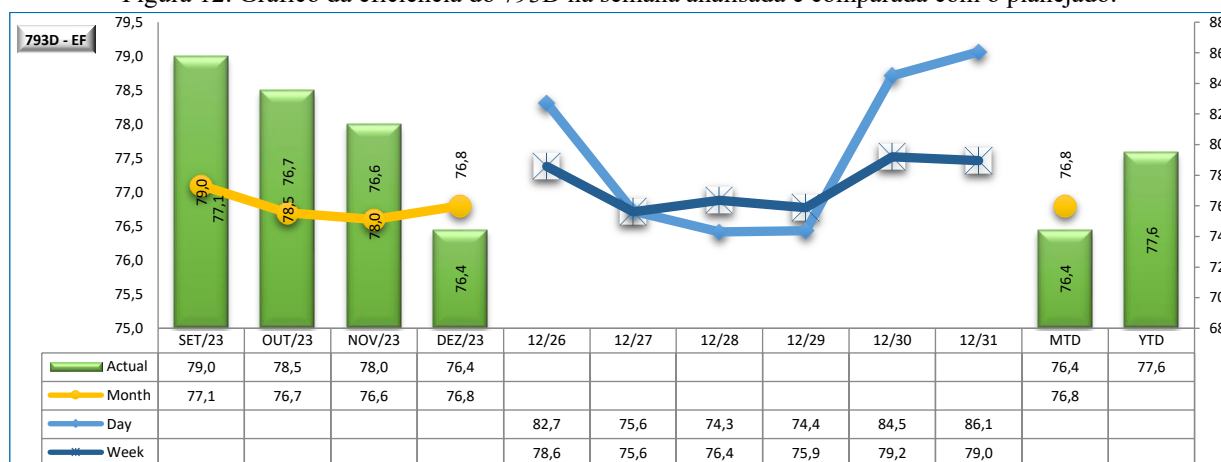
Assim, estão evidenciados abaixo os gráficos em questão.

Figura 11. Gráfico da utilização do 793D na semana analisada e comparada com o planejado.



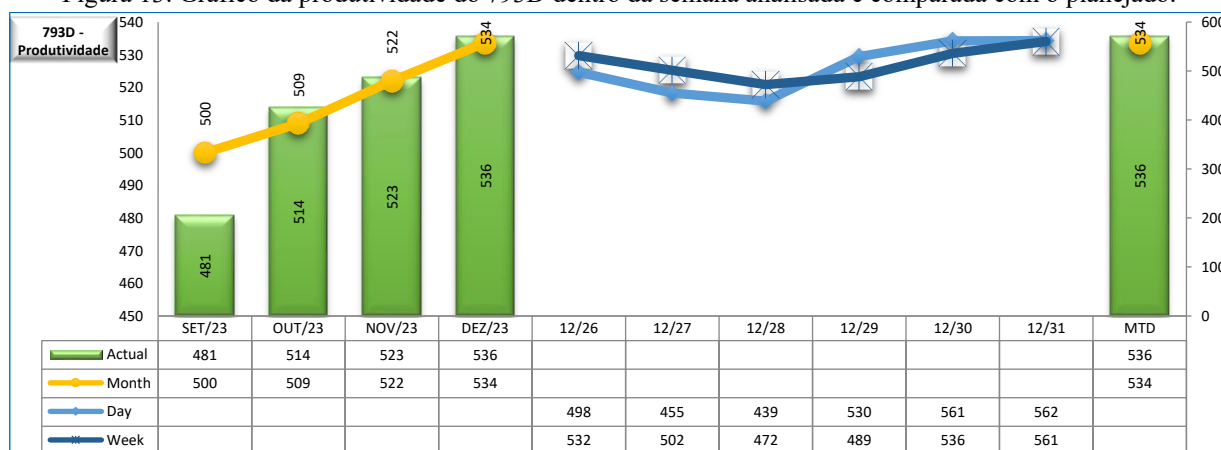
Fonte: Autoria própria.

Figura 12. Gráfico da eficiência do 793D na semana analisada e comparada com o planejado.



Fonte: Autoria própria.

Figura 13. Gráfico da produtividade do 793D dentro da semana analisada e comparada com o planejado.

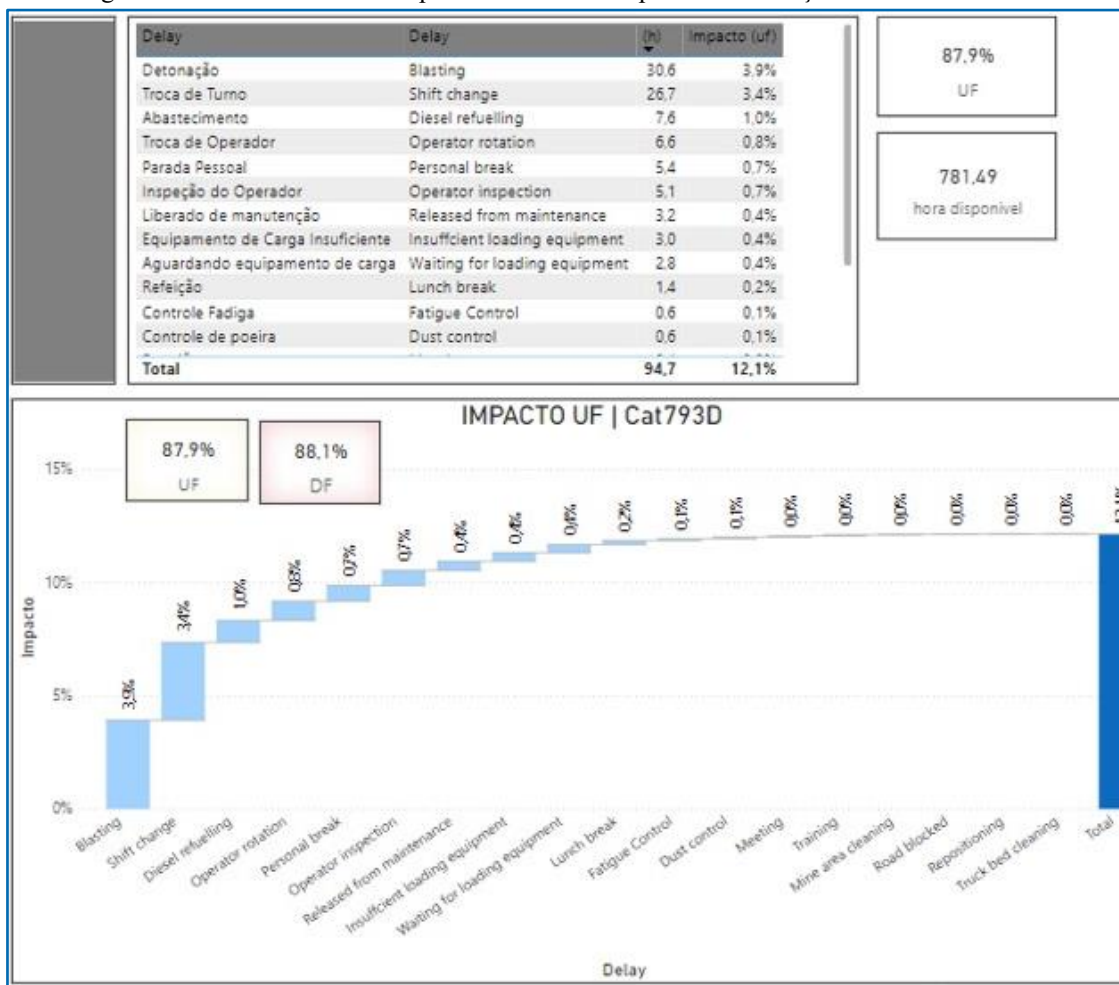


Fonte: Autoria própria.

No entanto, as horas ociosas impactam diretamente no fator de utilização e, consequentemente, afeta o rendimento operacional dos equipamentos. E, para maior controle, diariamente é feita a análise das horas improdutivas fazendo uso do sistema Minestar e podemos observar as horas acumuladas em cada evento no mês e diariamente.

Na Figura 14, temos o gráfico diário que retrata a hora ociosa do caminhão em horas (h) referente ao tipo de apontamento (*delay*), a porcentagem que impactou a utilização do equipamento (Impacto UF). Assim, temos o total de horas disponível do dia e a utilização média da frota (UF).

Figura 14: Análise das horas improdutivas com o impacto na utilização do caminhão 793 D.



Fonte: Autoria própria.

É notório, a partir do gráfico, que, neste dia em análise, a quantidade de horas ociosas decorrentes da detonação (30,6h) foi maior que a hora por troca de turno dos operadores (26,7h) que é uma variável difícil de controlar nesta mina que opera 24h por dia todos os dias da semana. Ou seja, o controle em razão dos fatores ambientais desta mina em questão é muito rigoroso por operar próximo à comunidade e impacta muito a produção. Ainda, neste gráfico é possível perceber horas de parada de equipamentos para o controle de poeira (0,6h) que também é um controle ambiental.

Em segundo lugar, a troca de turno, como já foi citada, é um agravante para as horas ociosas totais e, dessa forma, conclui-se que há uma necessidade de melhor alocação dos operadores dos equipamentos ou a contratação de mais profissionais, de acordo com o planejamento de produção da empresa para que não ocorra um valor alto de ocorrências por esse motivo. Automaticamente, se houver a contratação de novos operadores, reduzirá também as horas ociosas de troca de operador (6,6h).

É imprescindível que ocorram paradas para refeição, parada pessoal, troca de turno. No entanto, um trabalho de revezamento bem feito poderá minimizar esse impacto. Nesta empresa, o revezamento já ocorre no local onde se encontra o equipamento. E uma sugestão para reduzir as horas de troca de turno foi a de novas contratações para se ter “banco quente”, ou seja, no horário de troca de turno já teria uma turma em horário antecipado para iniciar a jornada que estaria pronta para fazer um revezamento na máquina.

No caso das ocorrências por equipamento de carga insuficiente e aguardando equipamento de carga, que corresponderam a (5,8h), a falta de sincronismo entre as operações unitárias de carregamento e transporte na mina leva os equipamentos de transporte a ficarem aguardando para serem carregados, mas que, neste dia em questão, a parada das máquinas para a detonação foi grande e possivelmente foi o agravante desta ociosidade uma vez que alguma das máquinas escavadeiras (Shovel-7495) ficou parada por estar dentro do cerco em que ocorreu a detonação.

5 CONCLUSÕES

Os resultados e discussões apresentadas evidenciam a complexidade e os desafios da operação de uma mina de grande porte, especialmente quando há uma proximidade significativa com comunidades locais que exigem rigorosos controles ambientais. A análise dos KPIs de lavra, integrando tanto o planejamento de curto prazo quanto o sequenciamento de lavra, demonstra a importância de uma abordagem multifacetada para otimizar a produtividade e eficiência das operações de mineração.

O planejamento de lavra de curto prazo é essencial para manter a operação dentro das metas diárias e semanais, levando em consideração as intercorrências programadas e inesperadas. As adaptações necessárias para mitigar o impacto ambiental, tais como a redução de atividades durante períodos de seca para controlar ruído e poeira, ilustram a necessidade de flexibilidade no planejamento operacional. Esse ajuste dinâmico, embora necessário para a conformidade ambiental, impacta negativamente a produtividade, especialmente em termos de disponibilidade e utilização dos equipamentos.

O sequenciamento de lavra semanal, incluindo o calendário de manutenção detalhado, permite uma previsibilidade mais precisa dos impactos nos KPIs. A coordenação entre as atividades de manutenção programada e a operação é essencial para minimizar paradas não planejadas e, consequentemente, reduzir o impacto negativo na produção. A análise das horas de manutenção revela a importância das manutenções preventivas sobre as corretivas, evidenciando que a antecipação de problemas pode reduzir custos e melhorar a disponibilidade dos equipamentos.

Os gráficos de movimentação de massa e utilização de caminhões fornecem uma visão clara da eficiência e produtividade dos equipamentos, como exemplo, o caminhão fora de estrada CAT 793D. A comparação entre o programado e o realizado, juntamente com a análise de variáveis como a carga transportada e a disponibilidade física, permite identificar áreas de melhoria e otimização. No entanto, as horas improdutivas, especialmente as decorrentes de fatores ambientais e operacionais, continuam sendo um desafio significativo.

A análise detalhada das horas ociosas e seu impacto nos KPIs destaca a necessidade de um controle rigoroso dessas variáveis. Eventos, tais como detonações e trocas de turno, são fatores inevitáveis que requerem estratégias de mitigação, como o revezamento adequado dos operadores e a contratação de pessoal adicional para minimizar o tempo de inatividade. A implementação de "banco quente" para trocas de turno pode ser uma solução eficaz para reduzir as horas ociosas e aumentar a eficiência operacional.

Em suma, a integração de análises detalhadas de planejamento, sequenciamento, manutenção e monitoramento dos KPIs é fundamental para a gestão eficiente de uma mina de grande porte. A capacidade de adaptar operações para mitigar impactos ambientais e operacionais, ao mesmo tempo em que se mantém o foco na produtividade e eficiência, é determinante para o sucesso contínuo da operação. A abordagem analítica e a implementação de melhorias contínuas, baseadas nos dados obtidos, são essenciais para enfrentar os desafios e alcançar uma operação de mineração sustentável e lucrativa.

REFERÊNCIAS

- ALVES, J. L. R.; LIMA, H. S. **Planejamento de longo prazo em minas a céu aberto**. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v. 30, n. 4, p. 553-564, 2000.
- AMARAL, M. **Modelos Matemáticos e Heurísticos Para Auxílio ao Planejamento de Operações de Lavra Em Minas a Céu Aberto**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Minas Gerais Belo Horizonte 2008.
- BAKHTAVAR, E.; SHAHRIAR, K. **Optimal Ultimate Pit Depth Considering An Underground Alternative**, Proceeding Of Fourth AACHEN International Mining Symposia - High Performance Mine Production, Aachen, Germany, 2007
- BORGES, T. C. **Análise dos custos operacionais de produção no dimensionamento de frotas de carregamento e transporte em mineração**. 2013. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.
- CAIXÊTA, Alisson Gomes; MATOS JUNIOR, Edward de. **Metodologia de implantação de indicadores de gestão da manutenção**. 2017. Faculdade Ietec. Disponível em: <https://www.ietec.com.br/clipping/2018/02-fevereiro/Metodologia-deimplantacao-de-indicadores-de-gestao-damanutencao.pdf>. Acesso em: 16 Jun. 2024.
- CÂMARA, T. R., et al. **Reconciliação: Ferramentas de Avaliação do Fator Mina / Usina**. 8º Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto / 8º Congresso Brasileiro de Mina Subterrânea. 6 a 8 de agosto de 2014. Belo Horizonte.
- CAMPOS, P. H. A. **Um Comparativo de Metodologias no Planejamento de Lavra: Sequenciamento direto de Blocos Vs. Planejamento Tradicional**. Ouro Preto 2017.
- CANDIDO, A. P. **Otimização na mineração: princípios e práticas**. São Paulo: Editora Minerax, 2012.
- CHAVES, C. R., Freitas, L. C., & Silva, M. A. (2019). **Planejamento de Médio Prazo em Mineração a Céu Aberto: Estudo de Caso na Mina X**. Revista de Mineração, 65(2), 124-135.
- CHIEREGATI, A. C., et al. **Reconciliação na mineração: desafios e soluções**. Journal of Mining and Geology, v. 40, n. 3, p. 297-309, 2008.
- CHIMUCO, J. P. J. **Metodologia de Planejamento de Mina Para Retomada Das Operações de Lavra Das Jazidas de Kassinga Norte – Angola**. Ouro Preto 2010.
- CLEMENTE, F. C.; ALMEIDA, L. P. **Otimização de cavas com o uso de softwares de planejamento**. Engenharia de Minas, v. 29, n. 2, p. 123-134, 2017.
- COSTA, A. F. **A relevância do planejamento de curto prazo na gestão de KPIs**. Revista de Mineração e Geologia, v. 15, n. 4, p. 98-107, 2018.
- CURI, A. **Minas a Céu Aberto: planejamento de lavra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014

FERREIRA, L. P. **Planejamento de curto prazo e KPIs: uma abordagem integrada**. Engenharia de Minas, v. 29, n. 2, p. 145-153, 2017.

HALATCHEV, R. A. **Technological factors in mine planning**. Journal of Mining Technology, v. 17, n. 2, p. 123-135, 2002.

HUSTRULID W.; KUCHTA M. **Open Pit Mine Planning & Design Volume 1**, Publisher: A Balkema Publishers; Student ed. edition 1994

HUSTRULID, W. A.; KUCHTA, M. **Mine Planning and Design**. London: Taylor & Francis, 1995.
IBRAM- Instituto Brasileiro de Mineração. **Workshop “Planejamento De Mina: Práticas e Experiências de Empresas de Mineração”**, Módulo I e II. Belo Horizonte, 1996.

JORGE, L. A.; SILVA, M. R.; FERREIRA, J. P. **Aplicações de softwares de modelagem geológica na mineração**. Revista Brasileira de Geociências, v. 45, n. 3, p. 245-258, 2015.

MIRANDA, A. C.; SOUZA, R. V. **Planejamento de médio prazo em mineração a céu aberto: desafios e soluções**. Mineração & Sustentabilidade, Belo Horizonte, v. 12, n. 2, p. 45-56, 2012.

MORALES, N. E., & RUBIO, E. M. (2009). **"Block Sequencing for Long-term Open-Pit Mine Planning with Mixed Integer Linear Programming"**. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 23(1), 34-48.

PEREIRA, L. F.; SILVA, M. A. **Estratégias de planejamento de longo prazo em minas a céu aberto**. Engenharia de Minas, Ouro Preto, v. 25, n. 1, p. 23-34, 2015.

PEREIRA, V. A.; MARTINS, E. F. **Aplicação de inteligência artificial e análise de dados na mineração**. Journal of Mining Innovation, v. 12, n. 1, p. 45-58, 2019.

PERONI, R. L. **Análise da Sensibilidade do Sequenciamento de Lavra em Função Da Incerteza do Modelo Geológico**. Porto Alegre 2002.

PETERSEN, J.; DOMINY, S. **Reconciliação na mineração: metodologias e melhores práticas**. Mining Journal, v. 47, n. 4, p. 210-222, 2013.

RODOVALHO, E. C. **Aplicação de ferramentas de simulação em operações mineiras para determinação de índices operacionais utilizados em planos de lavra adaptados ao estudo de caso da mineração casa de pedra - CSN**. 2013. 111 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

RUMBAUGH J. **Object-oriented modeling and design**. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1991.

SANTOS, R. A.; OLIVEIRA, F. R. **Integração de softwares de simulação e controle na mineração**. Mineração & Tecnologia, v. 10, n. 4, p. 89-102, 2018.

SAYDAM, S.; YALCIM, E. **Strategic Mine Planning: Methods and Applications**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON APPLICATION OF COMPUTERS AND OPERATIONS RESEARCH IN THE MINERAL INDUSTRY (APCOM 2002), 30., 2002, Phoenix. Proceedings [...]. Phoenix, 2002.

SILVA N. H. C. **Uma Abordagem sobre o planejamento de lavra de curto prazo com ênfase na metodologia da Programação diária (Line Up) da Mina de Salobo.** Parauapebas, 2014.

SILVA, A. B. **Planejamento de lavra a céu aberto: conceitos e práticas.** Rio de Janeiro: Editora Minerax, 2019.

SILVA, M. A.; PEREIRA, L. F. **Planejamento de curto prazo em minas a céu aberto: uma abordagem prática.** Engenharia de Minas, Ouro Preto, v. 25, n. 1, p. 23-34, 2018.

SILVA, N. C. S. **Metodologia de planejamento estratégico de lavra incorporando riscos e incertezas para a obtenção de resultados operacionais.** Tese de doutorado em engenharia mineral da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008. 128 p.

SMITH, M. L.; JONES, R. A.; BROWN, K. L. **Avaliação e reconciliação de teores na mineração.** Revista de Tecnologia em Mineração, v. 33, n. 2, p. 45-60, 2014.

SOUZA, R. A. **Análise e Controle dos Índices de Aderência e Cumprimento para Planos de Lavra.** 2013. 41 p. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2013.

SOUZA, R. M. **Importância do planejamento de curto prazo na mineração.** Revista Brasileira de Mineração, v. 34, n. 3, p. 212-220, 2015.

WRIGHT, D. P. **Geometria da cava final em mineração a céu aberto.** Journal of Mining Engineering, v. 6, n. 4, p. 33-41, 1990. **in deep mines.** Mining. Science and Technology (China), 21(2), p. 295–299, 2011.

XIMENES, G. F. **Plano mensal de lavra de uma mina de ferro localizada no quadrilátero ferrífero: um estudo de caso.** 2018. 41 f. (Graduação em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

MATERIAIS E TÉCNICAS DE PERFURAÇÃO DE POÇOS NO NORTE DO ESTADO DE MINAS GERAIS COMO ALTERNATIVA DE ABASTECIMENTO HÍDRICO

  10.56238/livrosindi202529-007

Alessandra Vitória de Jesus

Bacharel em Ciência e Tecnologia - UFVJM
Discente do curso de Engenharia de Minas - UFVJM
E- mail: alessandra.vitoria@ufvjm.edu.br

Jonatas Franco Campos da Mata

Engenheiro de Minas - UFMG
Mestre em Ciência e Tecnologia de Radiações, Minerais e Materiais - CDTN
Doutor em Engenharia de Minas, Tecnologia Mineral - UFMG
Professor Adjunto do curso de Engenharia de Minas da UFVJM
E- mail: jonatas.mata@ufvjm.edu.br

Jheimisson Luiz Santos

Bacharel em Ciência e Tecnologia, Engenheiro de Alimentos - UFVJM
Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos - UFVJM
E- mail: jheimisson.luiz@ufvjm.edu.br

Luana Alves de Lima

Geóloga e Mestre em Geologia – UFRJ
Doutora em Geociências, Geoquímica – UFF
Professora Adjunta do curso de Engenharia de Minas da UFVJM
Orientadora deste trabalho
E- mail: luana.lima@ufvjm.edu.br

RESUMO

A água subterrânea é um reservatório estratégico para o abastecimento mundial de água potável. No Norte de Minas Gerais, os aquíferos desempenham um papel crucial e a perfuração de poços é a forma mais eficiente de acessar a água subterrânea na região. Existem três métodos de perfuração, a saber: à percussão, rotativo e rotopneumático. A escolha depende das características geológicas da região. Este trabalho tem como objetivo principal estudar materiais e técnicas de perfuração de poços profundos disponíveis no mercado para o Norte de Minas Gerais. Buscou-se identificar o método de perfuração mais viável para proporcionar o abastecimento de água subterrânea para as atividades da região. Os objetivos específicos são apresentar uma tabela com empresas de hidrogeologia e seus serviços, além de uma tabela síntese com artigos sobre o tema em periódicos acadêmicos. Foram feitas pesquisas em sites de empresas perfuradoras para a coleta de informações sobre os serviços de perfuração, visando identificar o método mais empregado na região. Foram pesquisados, também artigos e teses relacionados ao tema nos últimos 20 anos, filtrando os mais relevantes de acordo com a metodologia. As informações coletadas foram tabuladas para fomentar a discussão e composição de uma tabela síntese que abordam métodos de perfuração com as seguintes informações: Nome, região/localidade, geologia, métodos de perfuração e fonte. A pesquisa mostra que o método de perfuração escolhido está diretamente relacionado com a geologia da região. Para rochas sedimentares, o método rotativo foi eficiente; para rochas basálticas, o método rotopneumático foi utilizado, e para metapelitos, o método à percussão foi empregado. Isso confirma a concordância com a bibliografia que destaca as vantagens e desvantagens de cada método de acordo com a rocha perfurada. O método mais adequado, de acordo com a geologia do Norte de Minas, é o rotopneumático, como indicado pelas pesquisas bibliográficas e em empresas perfuradoras. A metodologia empregada na presente pesquisa se mostrou eficiente para atingir os objetivos do trabalho. A concentração das empresas de perfuração em Montes Claros/MG deve-se a fatores

estratégicos, logísticos e econômicos, além da alta demanda por recursos hídricos na região. A pesquisa contribuiu com informações relevantes para a gestão dos recursos hídricos. Sugere-se futuros estudos para aprimorar técnicas e desenvolver inovações na perfuração de poços profundos. Uma pesquisa de campo com questionários direcionados aos perfuradores locais é proposta para enriquecer o estudo, considerando a hidrogeologia local e as necessidades da região.

Palavras-chave: Perfuração, Poços tubulares, Hidrogeologia.

1 INTRODUÇÃO

A água subterrânea desempenha um papel vital no abastecimento de água potável mundialmente. A importância do uso de água subterrânea reside no fato de que ela é uma fonte confiável e sustentável de água, capaz de suprir demandas domésticas, industriais e agrícolas.

De acordo Feitosa *et al.*, (2008), os recursos hídricos subterrâneos são frequentemente negligenciados nos planos de gestão de recursos hídricos em cada região. Isso se deve ao fato de que a utilização das águas subterrâneas serem menos onerosas do que as obras de infraestrutura associada a barragens e estações de tratamento de água superficial. No entanto, é importante ressaltar que os aquíferos representam a maior reserva de água doce líquida na Terra, com um volume estimado em cerca de 10,3 milhões de km³, enquanto rios e lagos acumulam aproximadamente 104 mil km³.

Na região do Norte de Minas, a perfuração de poços é de extrema importância devido às características geológicas e hidrogeológicas do local. A área é marcada pela escassez de recursos hídricos superficiais, como rios e lagos, e pela irregularidade das chuvas, que resultam em longos períodos de seca. Nesse contexto, as águas subterrâneas desempenham um papel crucial para suprir as demandas hídricas da região. Essa região possui formação geológica que pode apresentar em determinadas regiões volumes satisfatórios a depender da demanda hídrica. A ocorrência de água subterrânea se dá em aquíferos sedimentares, carbonáticos e em rochas fraturadas, que armazenam e conduzem a água (CPRM, 2019). A perfuração de poços para acessar as águas subterrâneas tem se tornado uma alternativa para garantir o abastecimento de água na região do Norte de Minas Gerais. Esses poços fornecem água de qualidade, que pode ser utilizada para diversas finalidades, como abastecimento humano, agricultura, pecuária e atividades industriais.

O Norte de Minas Gerais possui diversos aquíferos que desempenham um papel fundamental no abastecimento de água da região e os mais relevantes são o Aquífero Bambuí, Aquífero Urucuia e Aquífero São Francisco (ATMAN *et al.*, 2011).

Os aquíferos são definidos pelas características geológicas, como sua forma, composição das rochas e características hidrodinâmicas gerais. Devido às variações na capacidade de armazenamento e transmissão de água subterrânea em diferentes áreas. Eles são subdivididos em Unidades

Hidroestratigráficas. Essas unidades representam um único tipo de rocha ou um conjunto de formação geológicas relacionadas no tempo, que têm propriedades semelhantes de armazenamento e produtividade de água subterrânea (CPRM, 2019).

O Aquífero Bambuí possui rochas carbonáticas (calcário) e pelíticas (pelitos) que constituem um importante sistema de aquíferos nas regiões do Norte de Minas Gerais. Esse sistema de aquífero é explorado por mais de 300 poços tubulares na região e desempenha um papel crucial no fornecimento de água para consumo humano, irrigação e criação de animais, especialmente nas áreas de alto índice de seca do estado (SOUZA *et al.*, 2014).

Diante desse fato se faz necessário saber escolher a melhor técnica de perfuração que atenda as características geológicas da região do Norte de Minas a fim de atender os requisitos de qualidade, demanda hídrica e economicidade.

Segundo Gonçalves e Giampá (2006), existem três métodos de perfuração: Sistemas Mecânicos, Sistemas com Circulação Direta do Fluido e Sistema com Circulação Reversa. Para o autor cada método possui suas vantagens e limitações, e a escolha do método adequado depende das características geológicas da região.

De acordo com Feitosa *et al.*, (2008), os poços tubulares são considerados o modo mais prático e eficiente de captar água de um aquífero. Essa técnica é antiga e tem registro de poços construídos pelos chineses há cerca de 4.000 anos, que chegaram a atingir até 900 metros. Porém existem diferentes métodos de perfuração de poços, e os mais utilizados são:

1. À percussão, onde uma ferramenta pesada é levantada e abaixada rapidamente, golpeando a formação rochosa, que ajuda a desagregar ou fragmentar a rocha.
2. Rotativo, que consiste em usar movimentos giratórios de uma broca para triturar e desagregar a rocha.
3. Rotopneumático, é uma técnica que consiste a percussão de pequeno curso e alta frequência com a rotação para fragmentar a rocha durante a perfuração. O principal agente utilizado nesse método é o ar comprimido que fornece a força necessária para a perfuração de rochas mais duras.

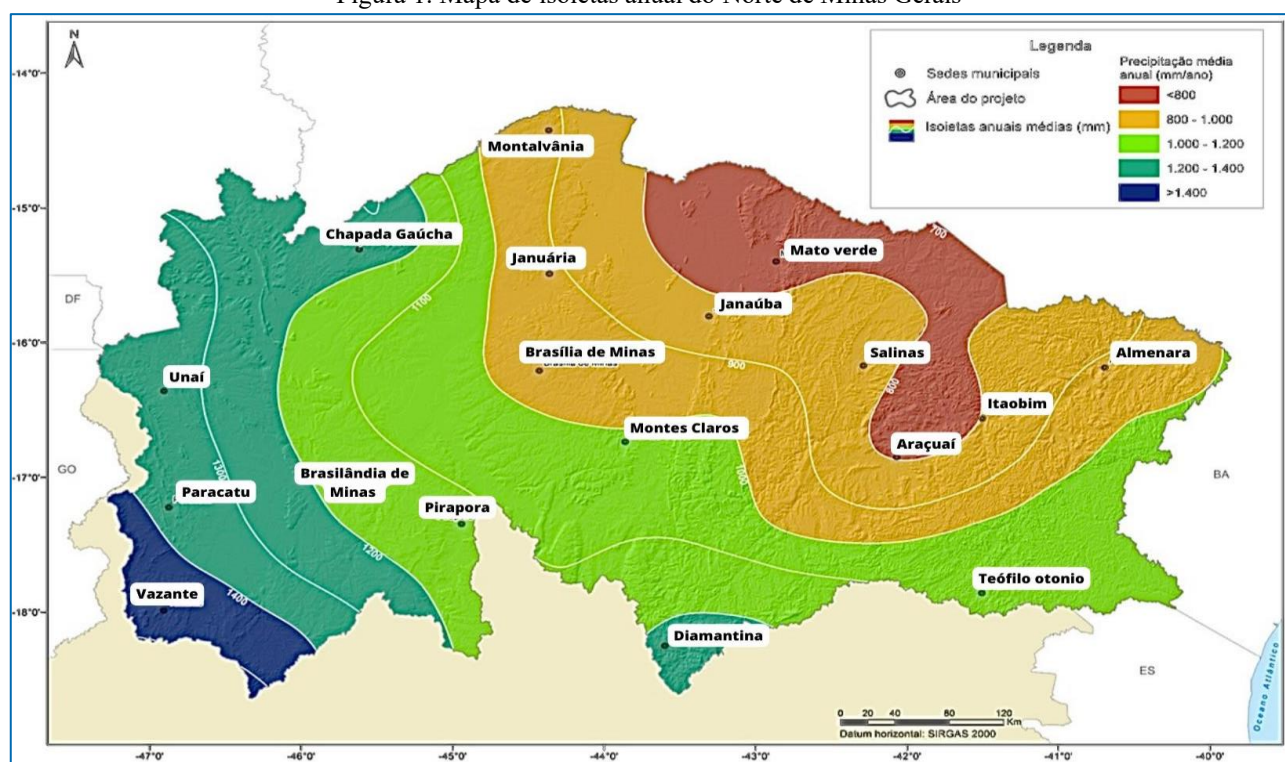
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS DO NORTE DE MINAS GERAIS

O estudo do padrão temporal e espacial da chuva na região do Norte de Minas Gerais é fundamental para permitir um planejamento e uma gestão eficaz dos recursos hídricos, considerando a demanda crescente por água na região. Com o intuito de realizar essa caracterização, são obtidos dados para elaborar isoietas médias, que são linhas que conectam pontos de igual quantidade de

precipitação em diferentes áreas da região norte de Minas Gerais (CPRM, 2019). Essa abordagem permite uma análise mais detalhada do comportamento das chuvas ao longo do tempo e em diferentes localidades, possibilitando a identificação de padrões sazonais, áreas de maior ou menor pluviosidade e tendências de variação ao longo dos anos. Na Figura 1 abaixo, é apresentado o mapa de Isoietas de precipitação do Norte de Minas Gerais. É possível observar, de acordo com esse mapa, que as regiões mais chuvosas são a cidade de Vazante, com precipitação de 1.400 (mm/ano), Paracatu, Unaí e Chapada Gaúcha com precipitações de 1.200 - 1.400 (mm/ano). E as regiões com climas mais secos são as cidades de Mato Verde e Araçuaí, com precipitações de 800 (mm/ano), Almenara, Itaobim, Salinas, Janaúba, Brasília de Minas, Januária e Montalvânia com precipitações de 800 – 1.000 (mm/ano).

Figura 1. Mapa de isoietas anual do Norte de Minas Gerais



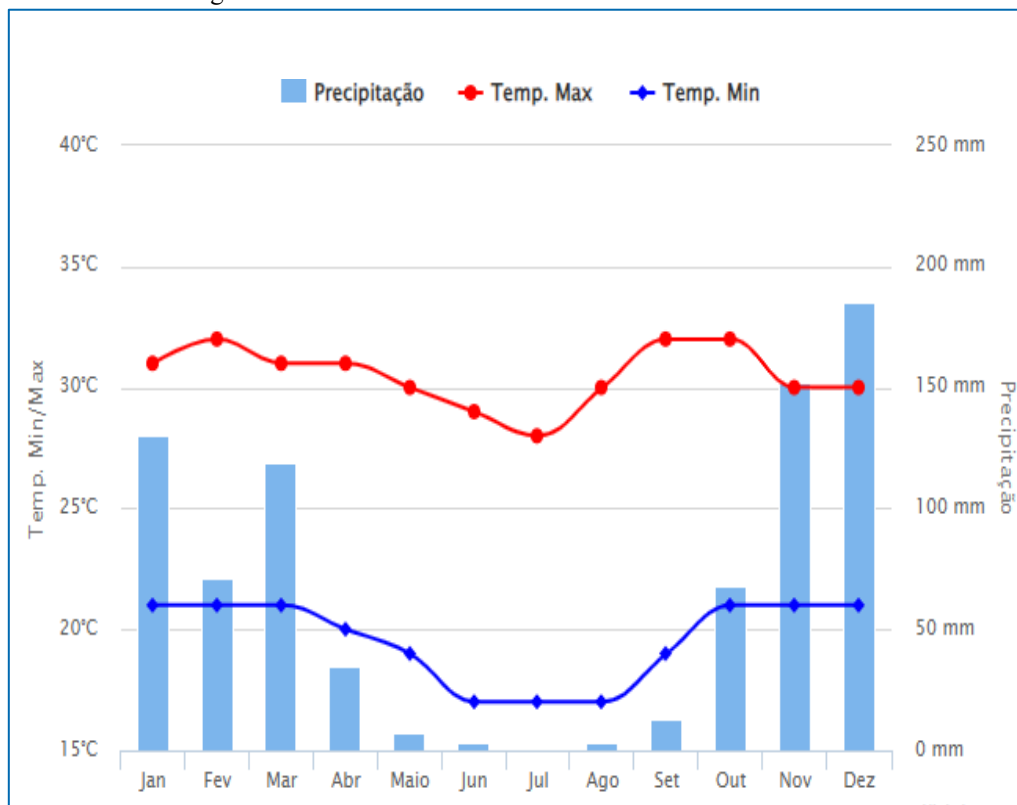
Fonte: CPRM (2019). Adaptado.

De acordo Souza *et al.*, (2014), a mesorregião do Norte de Minas Gerais, que abrange 89 municípios, possui uma área de 128.454,108 km² e uma população de 1.591.507 habitantes. Essa região é caracterizada por um clima semiárido, com chuvas escassas (inferior a 900 mm/ano) e altas temperaturas (média anual de 24°C). Essas condições climáticas tornam a região altamente suscetível à seca, com 9,84% de seu território localizado dentro do polígono das secas. Em termos de precipitação, o Norte de Minas Gerais possui duas estações bem definidas: uma chuvosa, que ocorre de outubro a abril, e uma estação seca, que ocorre de maio a setembro. Essa distribuição sazonal das

chuvas influencia diretamente a disponibilidade de água da região, afetando tanto a agricultura quanto o abastecimento hídrico da população. Tendo em vista a cobertura vegetal que é típica de cerrado e caatinga.

Para exemplificar as duas estações bem definidas do Norte de Minas Gerais é apresentado a seguir na Figura 2, a série histórica de chuvas do último ano hidrológico do município de Janaúba.

Figura 2. Série histórica de chuvas em Janaúba no ano de 2022



Fonte: www.climatempo.com.br

Com as medições das precipitações ao longo do ano é possível observar que as chuvas estão concentradas em um período de outubro a abril e de maio a setembro apresenta um período de seca.

2.2 HIDROGEOLOGIA DO NORTE DE MINAS GERAIS

Nas últimas décadas, as atividades relacionadas à hidrologia de águas subterrâneas no Brasil estiveram focadas na perfuração de poços na região Nordeste, principalmente em resposta à seca. Houve uma desaceleração devido a dificuldades econômicas, mas recentemente surgiram esperanças de avanços na hidrogeologia com a implementação dos Planos Estaduais de Recursos Hídricos, buscando uma exploração e gestão mais sustentáveis das águas subterrâneas (FEITOSA *et al.*, 2008).

O PANM - Projeto de Águas do Norte de Minas, visa avaliar as disponibilidades hídricas subterrâneas nas regiões Norte, Nordeste e Noroeste de Minas Gerais. Ele abrange uma área de cerca de 245.520 km², incluindo 181 municípios. Atualmente os usuários rurais podem captar até 14 mil litros diários de água de poços tubulares sem a necessidade de outorga (permissão), apenas com um cadastro de uso insignificante. Produtores rurais sem autorização, com poços que foram perfurados até 22 de junho de 2022, têm até 20 de junho de 2024 para regularização. A regularização permite cumprir as obrigações ambientais e fornecer informações sobre disponibilidade hídrica para a gestão dos recursos em Minas Gerais (EVANS, 2023).

Segundo o plano integrado de desenvolvimento do Norte e Nordeste do IDENE (2021), o panorama de perspectiva do Norte de Minas em relação a segurança hídrica, busca-se a implementação de Sistemas Integrados de Abastecimento de Água, que englobam a perfuração, equipagem e energização de poços artesianos, a instalação de reservatórios de água e a criação de uma rede de distribuição eficiente. No contexto da implementação de poços artesianos, são realizadas as etapas de perfuração, equipagem e energização desses poços, além da instalação de reservatórios de água. Em relação a segurança hídrica, infraestrutura e ao desenvolvimento econômico e social, os resultados e impactos esperados são: R\$944.689.576 em investimentos, uma estimativa de 85.790 em oportunidades de empregos com renda, e uma estimativa de 232.105 pessoas impactadas.

O Norte de Minas Gerais apresenta características hidrogeológicas distintas que são influenciadas pela variação climática principalmente pelo semiárido, pelas múltiplas feições de vegetação, e as diversas classes de solo. Essa região é composta principalmente de rochas carbonáticas e sedimentares que apresentam um sistema de aquíferos, tendo como seu principal reservatório o aquífero Bambuí (CPRM, 2019).

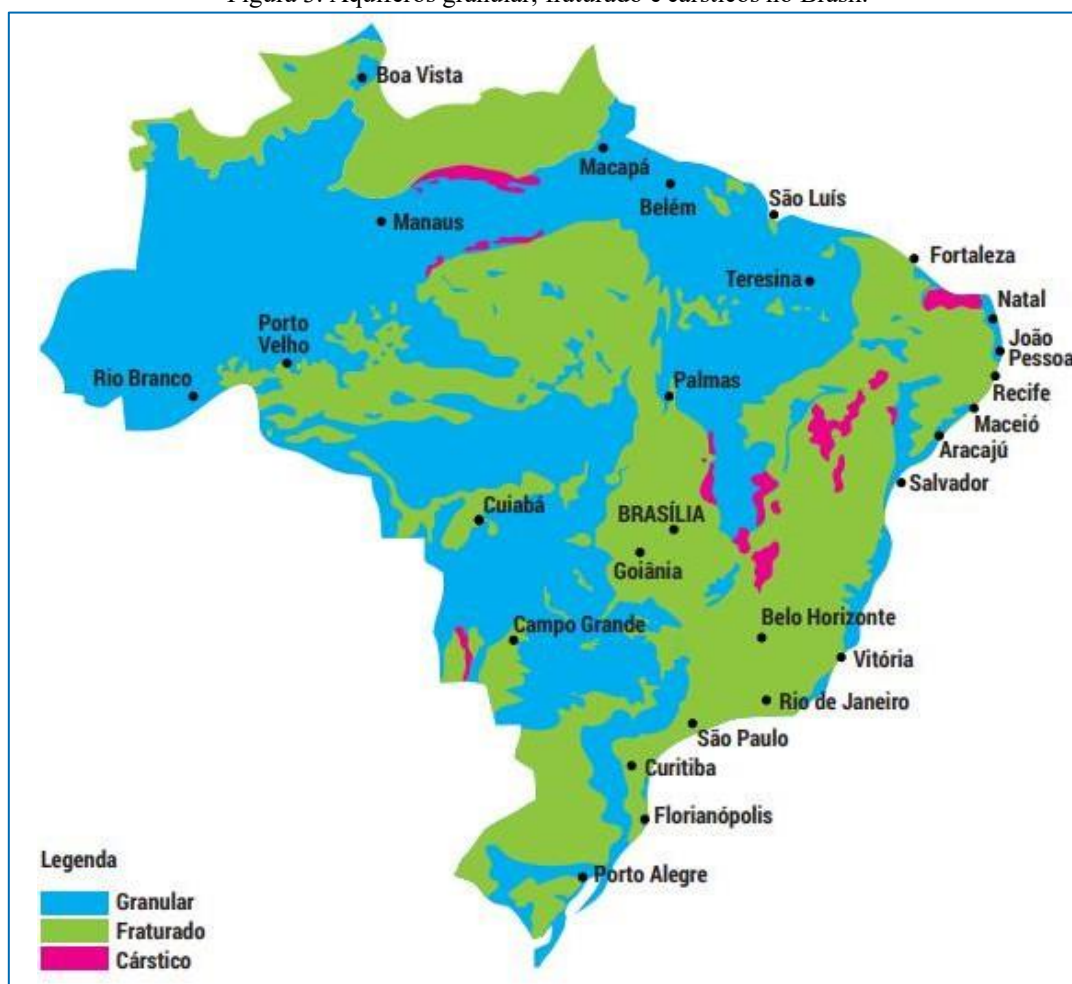
De acordo ANA - Agência Nacional de Água e Saneamento Básico (2022), aquíferos são classificados como unidades geológicas que têm a capacidade de fornecer água por meio de poços e podem ser classificados de acordo com os tipos de rochas e a pressão a que estão submetidos, o que afeta sua capacidade de armazenamento de água, velocidade do fluxo, taxas de recarga e vulnerabilidade à contaminação. Existem três categorias simplificadas de aquíferos em relação ao tipo de rocha que está relacionada à sua origem ou sedimento, seu grau de consolidação e fraturamento ou dissolução, os mesmos descritos a seguir:

Os **aquíferos cársticos** são formados por rochas carbonáticas carstificadas, que apresentam redes de condutos ou cavidades por onde a água é transmitida e armazenada. Esses aquíferos têm origem a partir do processo de dissolução de rochas solúveis, como calcário, dolomito, quartzito e arenito com cimentação carbonática. Eles são chamados de aquíferos de porosidade terciária devido ao processo de carstificação.

Os **aquíferos granulares** consistem em sedimentos ou rochas sedimentares. Eles são chamados de aquíferos de porosidade primária, pois essa porosidade é formada durante o processo de deposição dos sedimentos e é distribuída de forma uniforme, facilitando a extração da água.

Os **aquíferos fraturados** são compostos por rochas cristalinas, metamórficas e ígneas intrusivas, que possuem baixa permeabilidade primária. No entanto, essas rochas sofrem fraturamento devido a esforços tectônicos. Esses aquíferos são conhecidos como aquíferos de porosidade secundária, pois a água é armazenada nos vazios delimitados por essas fraturas na rocha, que possuem diversas orientações e se conectam entre si, formando um sistema ou rede de fraturas. A Figura 3 a seguir mostra a distribuição desses aquíferos pelo Brasil.

Figura 3. Aquíferos granular, fraturado e cársticos no Brasil.



Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA. Adaptado.

O Aquífero Bambuí é constituído por rochas calcárias e dolomíticas do Grupo Bambuí, e pode ser classificado em três tipos: fraturado, fraturado-cárstico e cárstico. Em geral, as áreas cársticas, onde predominam as rochas calcárias, são as mais produtivas em termos de extração de água por meio de poços. No aquífero fraturado, a água subterrânea é armazenada e flui por meio de fraturas presentes

nas rochas, permitindo sua exploração. Já nas áreas fraturado-cársticas, além das fraturas, também ocorrem características cársticas, como cavernas e dolinas, que aumentam a capacidade de armazenamento e fluxo de água subterrânea. No entanto, nas áreas cársticas as rochas calcárias sofrem dissolução, formando sistemas complexos de drenagem subterrânea, como condutos e fissuras, que permitem um armazenamento e fluxo significativos de água. (SOUZA *et al.*, 2014).

A água subterrânea no Norte de Minas Gerais é afetada pelas características das rochas permeáveis que a contêm. Essas rochas determinam tanto a quantidade como a qualidade da água. Através do estudo dessas rochas, é possível identificar as direções de fluxo favoráveis que resultam em maior disponibilidade de água e qualidade adequada para o consumo humano (ATMAN *et al.*, 2011).

Segundo Zoby *et al.*, (2004), o sistema aquífero Bambuí abrange uma área extensa de 146.227 km² e é notável pela presença de poços que possuem uma vazão média de 11 m³/h e uma capacidade específica média de 3,619 m³/h/m. Ele se destaca como o maior aquífero com potência hídrica elevada em termos de quantidade de água disponível e reservas, comparado a outros sistemas aquíferos presentes no domínio Fraturado-Cárstico. Essas características conferem uma significativa importância e valiosa fonte de água subterrânea nesta região.

A análise da composição química das águas subterrâneas é uma valiosa técnica que permite avaliar a dinâmica e as características dos aquíferos, bem como determinar a sua adequação para diferentes usos (CPRM, 2019).

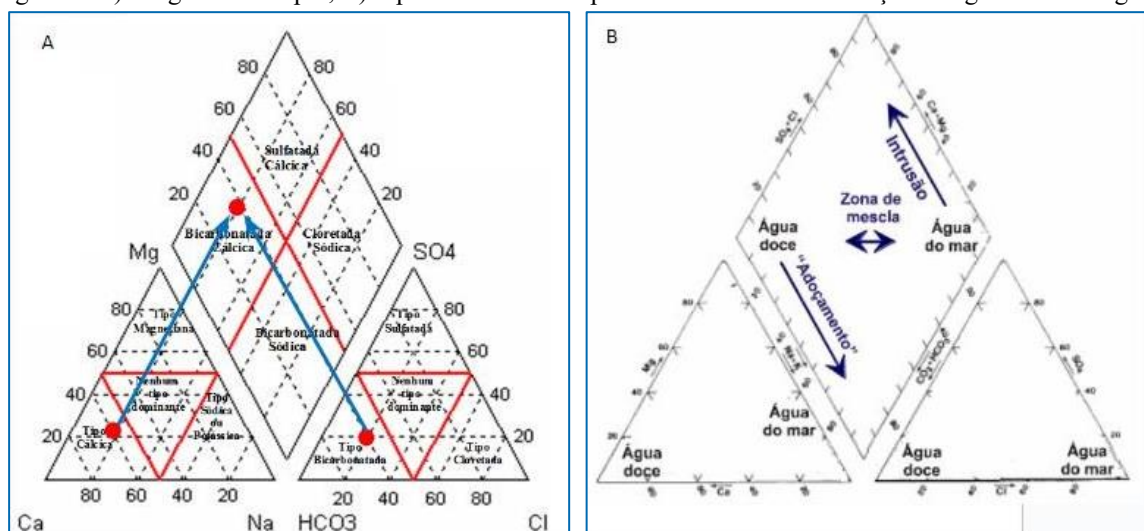
Segundo Souza *et al.*, (2014), às fácies hidroquímicas são corpos de água subterrânea com composições químicas distintas, agrupadas com base em semelhanças de composição e origem. Elas são determinadas pela litologia, cinética da solução e padrão de fluxo do aquífero, fornecendo informações sobre os processos ambientais contínuos.

No aquífero bambuí essas fácies são classificadas com base nos íons dominantes: cálcio (Ca), bicarbonato (HCO₃), potássio (K), cloro (Cl), magnésio (Mg), sulfetos (SO₄) e sódios (Na) (CPRM, 2019). Para saber se é adequada para consumo humano, que de acordo a estudos 90% pode ser consumidos e dos 10% das medições que foram consideradas inadequadas, 5,7% excederam os limites relacionados a características sensoriais (sabor, odor e cor) e os outros 4,3% representaram riscos a saúde (SOUZA *et al.*, 2014).

O diagrama de Piper é uma representação gráfica muito utilizada para caracterizar estudos hidrogeoquímicos classificando diferentes grupos de águas com base nos íons dominantes presentes. Ele permite identificar e comparar a composição química das amostras de água de forma simplificada. O sistema de classificação baseia-se na concentração de íons presentes na água. Se a concentração de um ânion ou cátion ultrapassar em 50% a soma das concentrações de todos os íons, a água é

classificada de acordo com esse íon dominante. Se nenhum íon ultrapassar esse valor, a classificação é feita com base nos dois íons mais abundantes (SANTOS, 2008). Esse diagrama é útil para visualizar várias amostras de água subterrânea em um único gráfico e identificar diferentes grupos ou famílias de tipos hidroquímicos. Ele também ajuda a relacionar esses grupos com a rocha-fonte ou processo. Além disso, o diagrama de Piper pode revelar misturas de águas e mostrar tendências de evolução e mudanças na composição química da água (LIMA, 2019). A Figura 4 a seguir demonstra o diagrama de Piper e a mistura de águas.

Figura 4. A) Diagrama de Piper, B) Piper destacando os procedimentos de combinação de água doce e salgada.

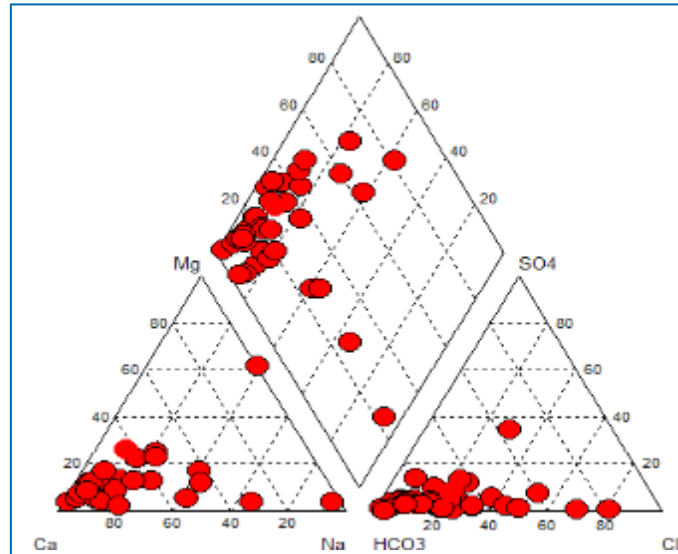


Fonte: LIMA (2019). Adaptado.

De acordo Silva *et al.*, (2008), ao categorizar as fácies hidroquímicas das águas extraídas de poços profundos no Norte de Minas Gerais, foi constatado que 81,1% são classificadas como bicarbonatadas-cálcicas, pois apresenta um alto teor de bicarbonato e cálcio. Além disso, 13,5% são consideradas cloradas-cálcicas que apresenta uma presença significativa de cloretos e cálcio, enquanto 5,4% são classificadas como bicarbonatadas- sódicas que apresentam baixo teor de bicarbonato e sódio. Essas porcentagens representam a distribuição das diferentes composições químicas encontradas nas águas subterrâneas desses poços profundos.

A Figura 5 apresenta um diagrama de Piper que mostra a classificação e qualidade de água do Norte de Minas Gerais. Devido à presença significativa de bicarbonato de cálcio, essa classificação é atribuída às características geológicas e hidrogeológicas da região do Bambuí, que influenciam diretamente a composição química das águas. Portanto as águas subterrâneas do aquífero Bambuí são classificadas como bicarbonatadas – cálcicas.

Figura 5 - Diagrama de Piper do Norte de Minas Gerais



Fonte: SILVA *et al.*, (2008). Adaptado.

2.3 POÇOS TUBULARES PROFUNDOS

São chamados de poços tubulares todos os poços que são perfurados para extrair água subterrânea e recebem um revestimento feito de tubos, sejam eles de metal ou plástico. Esses tubos têm diversas finalidades ao longo da vida útil do poço. Esses poços são também conhecidos como poços artesianos (FEITOSA *et al.*, (2008). Um poço ou sistema de poços é uma obra para extrair água subterrânea utilizando uma sonda que perfura o solo verticalmente (NBR 12244:1992). Conhecido como poço artesiano, o mesmo apresenta uma estrutura hidráulica circular perfurada com equipamentos especializados e diâmetro reduzido. Ele é projetado e construído para permitir a extração econômica de águas de camadas mais profundas do subsolo, que são compostas por um ou mais aquíferos (IGAM, 2010). A Figura 6 a seguir mostra um poço perfurado.

Figura 6. Captação de água em um poço perfurado.



Fonte: Instituto Mineiro de Gestão de Águas – IGAM. Adaptado.

De acordo Gonçalves e Guiampá (2006), a fim de evitar surpresas indesejadas e custos elevados durante a perfuração de um poço, é essencial que os projetos de poços tubulares profundos sejam baseados em informações obtidas por meio de um estudo hidrogeológico. Alguns aspectos que são normalmente considerados e utilizados na prática de construção de poços são: a litologia a ser perfurada; a metodologia de perfuração; a perfuração para instalação de tubo para proteção sanitária; o método de cimentação desse tubo; os diâmetros de perfuração do poço propriamente dito; a profundidade; os diâmetros de revestimento da tubulação lisa; as especificações de materiais; os diâmetros e especificações de materiais dos filtros; o tipo de fluido de perfuração; pré-filtro; a forma de injeção do pré-filtro; a perfilagem; o desenvolvimento e os testes. É necessário escolher cuidadosamente o local de perfuração de um poço, visando obter água em quantidade e qualidade adequadas, ao mesmo tempo em que se busca minimizar os custos envolvidos.

O sistema de poços deve garantir que a água seja fornecida de forma contínua e constante, sem comprometer a sua qualidade. Ao longo da sua vida útil, o sistema de poços deve ser supervisionado e monitorado como parte integrante dos recursos hídricos da região (NBR 12212:1992).

2.4 MATERIAIS E MÉTODOS DE PERFURAÇÃO DE POÇOS TUBULARES

Existem vários métodos de perfuração de poços, e cada um apresenta características diferentes.

De acordo com Feitosa *et al.*, (2008), os métodos mais práticos para a perfuração de um poço são a percussão, rotativo e rotopneumático.

O **método à percussão** consiste em utilizar uma ferramenta pesada que se movimenta continuamente para cima e para baixo, golpeando a formação rochosa. Esse movimento repetitivo tem o objetivo de desagregar e/ou fragmentar a rocha. São utilizados apenas pequenos e simples materiais nesse método, que são eles:

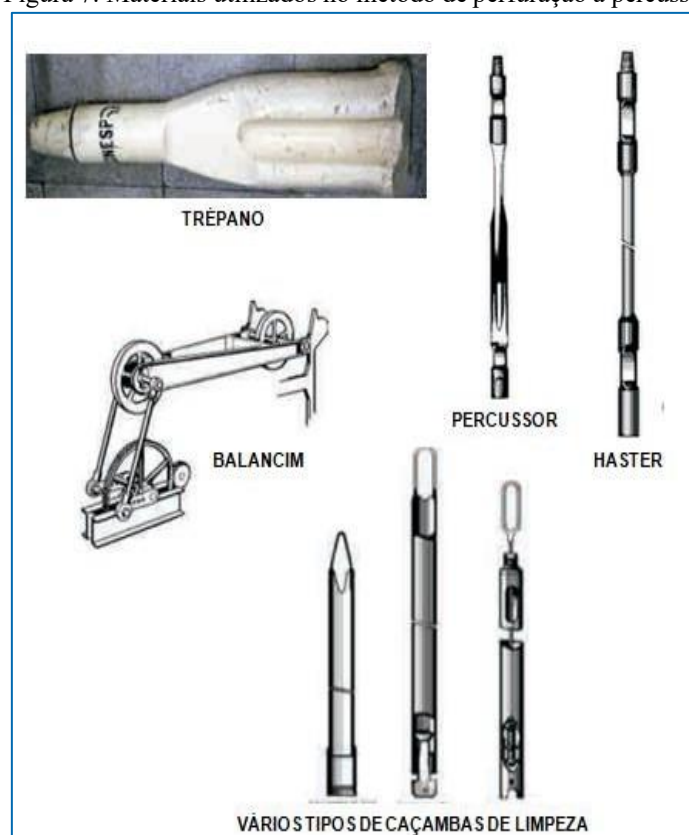
- **Trépano:** ferramenta responsável por quebrar a rocha. Possui um peso que varia de 100 a 500 kg para diâmetros menores e de 500 a 1.200 kg para diâmetros maiores.
- **Haster:** ferramenta que tem a função de adicionar peso à coluna de perfuração e guia, auxiliando na manutenção da verticalidade do poço. Possui um comprimento de 3 a 5 metros e um peso que varia de 400 a 1.000 kg.
- **Percussor:** ferramenta que possui a função de proporcionar um segundo impacto do trépano, aumentando a capacidade de perfuração. Além disso, também permite aplicar um impacto maior para cima na coluna quando esta fica presa durante uma operação de retirada de equipamentos presos (pescaria). Em pescarias, é possível aumentar ainda mais o impacto para

cima invertendo a posição da haste, ampliando o movimento de impacto. Esse duplo choque previne o aprisionamento do trépano, especialmente em formações argilosas. Possui um espaçamento entre os anéis que varia de 30 a 50 cm.

- **Porta cabo:** serve para fixar o cabo de aço ao restante da coluna de perfuração.
- **Cabo de aço:** ferramenta que desempenha o papel de ligar a coluna de perfuração ao sistema de impacto (percussor), permitindo o movimento de ida e volta do trépano.
- **Balancim:** ferramenta que realiza os movimentos de ida e volta do cabo de aço e de toda a coluna de perfuração.
- **Caçamba de limpeza ou bomba de areia:** são ferramentas usadas para remover o material desagregado ou quebrado pelo trépano durante a perfuração de um poço. São presas a um segundo cabo de aço separado da coluna de perfuração principal fazendo com que facilite a operação de limpeza.

A Figura 7 a seguir mostra alguns materiais utilizados no método de perfuração à percussão

Figura 7. Materiais utilizados no método de perfuração à percussão



Fonte: FEITOSA *et al.*, (2008). Adaptado.

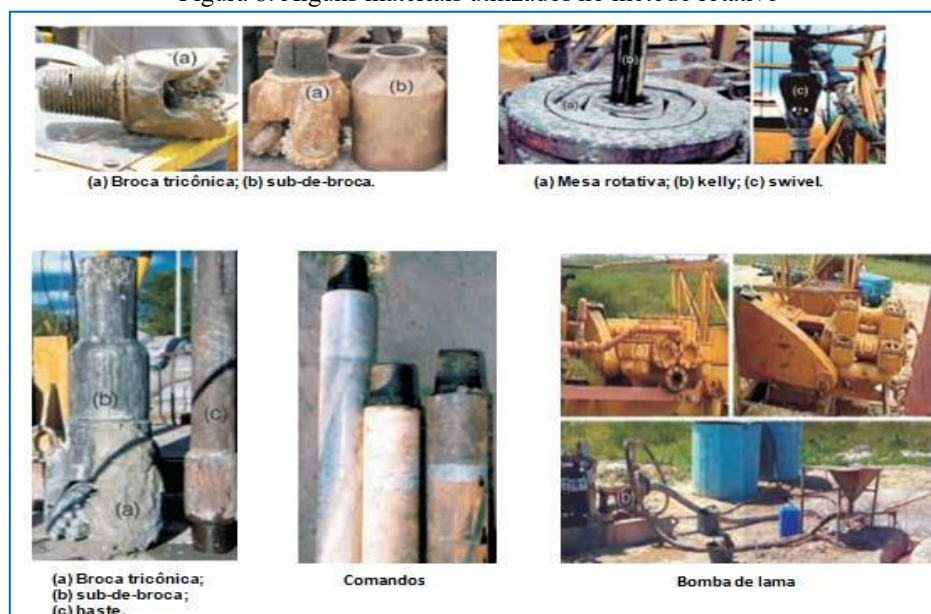
O **método rotativo**, utiliza o movimento giratório de uma broca para perfurar e desagregar a rocha. Ele foi desenvolvido em 1860 e envolve o uso de sondas rotativas de diferentes tamanhos, dependendo da profundidade e diâmetro desejados. A coluna de perfuração e a perfuratriz são componentes essenciais desse método, responsáveis por transmitir o torque e a força de penetração da broca, além de controlar a velocidade e pressão aplicadas durante a perfuração. A escolha da broca adequada depende das características geológicas do terreno, enquanto a dureza e resistência da rocha afetam a taxa de penetração e eficiência do processo. A seguir serão apresentados os principais materiais relevantes de perfuração e da perfuratriz utilizados no método rotativo.

- **Broca:** tem como função principal desagregar e triturar a rocha durante a perfuração e fica na frente da coluna de perfuração no método rotativo. Existem diferentes tipos de brocas, mas a broca tricônica é a mais comumente utilizada nesse método.
- **Sub-de-broca:** é o componente que conecta a broca aos comandos da sonda de perfuração.
- **Comandos:** são hastes especiais, de peso significativo, posicionadas logo acima do sub-de-broca na coluna de perfuração. A principal função é fornecer peso à coluna de perfuração e prevenir sua ruptura durante o processo de perfuração.
- **Haster:** no método rotativo são elementos que transmitem o movimento giratório da mesa rotativa para a broca em profundidade. Além disso, desempenham um papel importante na condução do fluido de perfuração dos tanques de lama até o fundo do poço, ou em sentido contrário. Por esse motivo são ocos.
- **Mesa rotativa:** é a parte da sonda de perfuração que executa os movimentos de rotação da coluna de perfuração.
- **Kelly:** haste com seção quadrada ou hexagonal que se encaixa na bucha da mesa giratória da sonda. Sendo a última haste da coluna de perfuração no método rotativo e sua função é receber e transmitir os movimentos de torção à coluna de perfuração.
- **Swivel:** peça rosqueada no topo do kelly e permite a conexão da mangueira da bomba de lama à coluna de perfuração, unindo os dois elementos pois a coluna de perfuração tem movimentos giratórios enquanto a mangueira da bomba de lama é fixa.
- **Bomba de Lama:** tem a função de impulsionar o fluido de perfuração para dentro do poço por meio da coluna de perfuração (circulação direta) ou de retornar o fluido dos tanques de lama de volta para os tanques através do espaço anular do poço (circulação inversa).
- **Fluido de perfuração:** o fluido de perfuração desempenha um papel essencial para o sucesso da perfuração. Sustenta as paredes do poço, limpa o material desagregado, mantém os fragmentos em suspensão, lubrifica e resfria a broca, além de ajudar no processo de perfuração. Em poços mais profundos, um engenheiro químico é responsável pelo fluido,

enquanto em perfurações menores, um técnico garante que as propriedades químicas e físicas adequadas sejam mantidas. As principais propriedades controladas são densidade, viscosidade, pH, filtrado e teor de areia.

A Figura 8 a seguir mostra alguns materiais utilizados nesse método.

Figura 8. Alguns materiais utilizados no método rotativo



Fonte: FEITOSA *et al.*, (2008). Adaptado.

No contexto do método rotativo o circuito do fluido de perfuração é ao lado da sonda de perfuração, é construído um sistema para circulação e tratamento do fluido utilizado, conhecido como canteiro de perfuração. Esse sistema é composto por tanques para preparo, decantação e armazenamento da lama, canaletas de circulação, peneira, desareiator e dessiltador. É essencial manter a lama limpa, garantindo que apenas o fluido mais limpo retorne para o poço. Demonstrado na Figura 9 a seguir.

Figura 9. Preparação do circuito do fluido de perfuração



Fonte: FEITOSA *et al.*, (2008). Adaptado.

Quanto a amostragem de calha a mesma ocorre, com a amostragem do material durante a perfuração de um poço é fundamental para o projeto final e para entender a geologia da área. No método de perfuração à percussão, as amostras são coletadas da caçamba de limpeza, enquanto no método rotativo, as amostras são coletadas antes do fluido passar pela peneira ou na canaleta do circuito de lama. São necessários cuidados na análise e coleta das amostras, como evitar contaminação do material coletado pelo fluido de perfuração, separar corretamente o fluido da amostra e evitar confundir fragmentos de metal com minerais metálicos.

A Perfilagem Geofísica de Poço é uma ferramenta importante para obter informações detalhadas sobre a sequência de rochas atravessadas durante a perfuração de um poço. Após a perfuração, são realizados vários tipos de perfis geofísicos, como raios gama, elétricos (resistividade), potencial espontâneo (SP), indução, calíper, desvio ou inclinação, temperatura e sônico. Esses perfis analisam diferentes propriedades físicas das rochas e permitem identificar litologias, marcar contatos geológicos com precisão e identificar zonas aquíferas promissoras. Essas informações auxiliam no desenvolvimento do projeto do poço.

O **método rotopneumático** envolve a fragmentação da rocha por meio de uma combinação de percussão, com movimento curto e frequência alta, e rotação. O ar comprimido, proveniente de compressores de alta potência, é o fluido principal utilizado nesse método. Geralmente, é empregado para perfurar rochas compactas, como as de natureza cristalina, apresentando alta eficiência. A coluna de perfuração é composta apenas por uma broca e uma peça chamada "martelo", que conecta a broca à haste e proporciona a potência de impacto e a frequência de percussão através da passagem de ar. A Figura 10 a seguir demonstra os dois materiais utilizados nesse método.

Figura 10. Materiais utilizados no método rotopneumático



Fonte: FEITOSA *et al.*, (2008). Adaptado.

Segundo Gonçalves e Guiampá (2006), existem três métodos de perfuração listados a seguir:

1. **Sistemas Mecânicos**, que envolvem a utilização de diferentes abordagens, como percussão a cabo, testemunhagem contínua e balde de testemunhagem.
2. **Sistema com Circulação Direta do Fluido**, que incluem diferentes métodos como o rotativo com circulação direta, martelo ou “Down the Hole” e hidráulico.
3. **Sistema com Circulação Reversa**, que também possuem variações como rotativo com circulação reversa, rotativo com circulação reversa com Haster dupla e rotativo com circulação reversa com Haster dupla e martelo.

Na tabela 1 a seguir é apresentado um resumo das vantagens e desvantagens relacionados a cada um dos métodos de perfuração de poços e tipos de formação geológicas.

Tabela 1. Vantagens e desvantagens dos métodos de perfuração de poços e tipos de formações geológicas

Método	Vantagens	Desvantagens
Rotativo com circulação direta	Amostragem de padrão médio; Rápida penetração (entre 5 a 20 metros/hora).	Necessidade de bom controle do fluido de perfuração
Rotativo com circulação Reversa	Boa amostragem; Rápida penetração (entre 5 a 20 metros/hora).	Fluido á base de água
Formação sedimentares consolidadas (calcários, silitos e calcarenitos)		
Percussão a cabo	Bom rendimento; Bom controle de amostragem e de nível de água; Avanço na ordem de 2 a 3m/h.	Não é eficiente na perfuração de sedimentos duros o consolidados
Rotativo com ar, água ou circulação de fluido	Bom rendimento Boa penetração (6 a 10m/h)	Necessário controle de fluido de perfuração
Martelo	Rápida penetração	Produz pedaços de detritos

Formação cristalina (rochas ígneas e metamórficas)		
Cabo	Boa amostragem	Baixo rendimento (0,4 a 0,7 m/h); Variação do nível e de entradas de água.
Rotativo com ar água ou circulação de fluido	Boa amostragem; Bom rendimento.	Custo elevado; Justifica-se apenas para grandes profundidades e diâmetros, com uso de brocas de dentes de tungstênio e com relação peso/área adequada
Martelo	Rápida penetração (entre 6 a 20 m/h); Bom controle de amostras e de entrada e volume de água potencial	Não possui

Fonte: Guimá (2006) *apud* BORN (2021). Adaptado.

É necessário realizar uma preparação adequada no local de perfuração, garantindo a instalação da perfuratriz e seus acessórios, além da construção das estruturas temporárias, como reservatórios de lama e água, valetas de escoamento, entre outros. O construtor deve garantir que tenha disponível na obra uma máquina perfuratriz, além de equipamentos, ferramentas e materiais em quantidade e capacidade adequadas para garantir a execução dos trabalhos. E Qualquer substituição necessária de máquina, ferramenta ou acessório durante a perfuração, para seguir o programa de construção do poço, deve ser responsabilidade e custo do construtor (NBR 12244:1992).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir os objetivos do presente trabalho foram pesquisados artigos e teses relacionados ao tema no portal da capes e Google acadêmico utilizando as palavras chaves “perfuração”, “poços tubulares” e “hidrogeologia” nos últimos 20 anos.

Foram filtrados os artigos que mais se aproximam da área ou das características hidrogeológicas do Norte de Minas Gerais.

As informações coletadas dos artigos estudados foram tabuladas em um banco de dados para confecção de uma tabela síntese com objetivo de discutir os resultados da pesquisa. Foram efetuadas pesquisa em sites de empresas perfuradoras para a coleta de informações sobre os serviços de perfuração para identificar o método mais empregado na região.

4 RESULTADOS

Na Tabela 2 a seguir, é apresentado uma pesquisa com empresas de hidrogeologia, seus serviços incluindo métodos de perfuração no Norte de Minas e seu link para acesso destas informações.

Tabela 2. Empresas de perfuração no Norte de Minas e serviços de hidrogeologia prestados

Nome	Serviços de Hidrogeologia	Métodos de Perfuração	Link de Acesso
Minas Poços	Perfuração de Poços Tubulares; Aprofundamento de Poços; Testes de Vazão; Poços de Monitoramento; Recuperação e Manutenção de Poços; Fornecimento e Instalação de Bombas Submersas.	Rotopneumático, rotativo e à percussão	https://minaspocos.com
Jet Água	Perfuração de Poços; Manutenção de poços.	Rotativo, à percussão e rotopneumático	http://www.jetagua.com.br
Aguacenter Poços Artesianos	Perfuração de Poços Tubulares; Perfuração de poços tubulares em pequenos espaços físicos; Aprofundamento de poços; Recuperação e manutenção de poços; Testes de vazão; Fornecimento e instalação de bombas submersas; Estudos hidrogeológicos e geofísicos; Piezômetros; Perfilagem ótica (filmagem de poços); Outorga de poços junto ao IGAM; Teste de interferência;	À percussão e rotopneumático	https://aguacenter.com.br
Norte Poços	Perfuração de Poços; Manutenção e Limpeza; Instalação de bombas.	Realiza a perfuração de acordo as especificações e requisitos do cliente	https://nortepocos.com.br
Apê Poços Artesianos	Perfuração de Poços; Manutenção preventiva ou corretiva; Limpeza de poços; Aprofundamento de Poços; Licenciamento ambiental; Teste de vazão; Venda e instalação de Motobombas submersas; Locação por geofísica.	Não descreve no site	https://www.aepocos.com.br

Fonte: Próprio autor (2023).

É evidente que o método de perfuração mais prevalente entre as empresas pesquisadas do Norte de Minas é o rotopneumático. Pois apesar da região possuir uma geologia diversificada, com a predominância de rochas calcárias e meta sedimentares, tal método é eficaz em perfurar rochas duras. Isso está em consonância com a pesquisa bibliográfica que indica bom rendimento e boa penetração deste método em rochas calcárias diminuindo assim o custo.

A maioria das empresas de perfuração está localizada na cidade de Montes Claros. Tal fato pode ter relação por Montes Claros ser uma cidade estratégica com um dos principais polos econômicos da região, uma infraestrutura mais desenvolvida próxima a áreas com alta demanda de recursos hídricos, tanto para uso doméstico quanto para atividades industriais e agrícolas. Sua localização central facilita o acesso a várias cidades e propriedades rurais da região, tornando-a uma escolha conveniente para empresas que prestam serviços de perfuração de poços.

Nem todas as empresas oferecem somente serviços de perfuração. Elas igualmente oferecem uma variedade de serviços, pois isso lhes permite atender a diferentes necessidades dos clientes e oferecer soluções completas para projetos relacionados à água subterrânea.

Foi observado na busca que existem empresas de hidrogeologia que perfuram na região mas não possuem site com informações que pudessem alimentar a pesquisa. No entanto, é um dado que mostra o grande potencial na região para perfuração. A seguir, é demonstrado uma lista de empresas encontradas no google maps que perfuram no Norte de Minas.

- **Piritiba Poços Artesianos:** BR-122, 831 - Algodões I, Janaúba - MG, 39440-000
- **Hidrovida Poços Artesianos:** Rua apolonia Mendes Pereira, N° 248 – Cicero Passos – Pirapora –MG, 39270-000
- **Aguamontes Poços Artesianos:** Av. Dep. Esteves Rodrigues, 640 - João Gordo, Montes Claros - MG, 39400-215
- **Arl poços Artesianos:** R. Plácido Burrego, 88A, Jaíba - MG, 39508-000
- **J R Poços Artesianos:** R. João Avelino Neto, 95 - Canelas, Montes Claros - MG, 39402-334
- **Marciel Poços Artesianos:** R. Cel. Serrão, 365 - Centro, Januária - MG, 39480-000
- **J J Perfurações:** R. C - Eldorado, Januária - MG, 39480-000

Devido à falta de informações detalhadas sobre este tema, torna-se necessário realizar entrevistas com perfuradores locais. Nem todas as empresas oferecem serviços de perfuração em seus sites, o que reforça a importância de fazer pesquisas de campo para obter mais dados. Entrevistas com especialistas fornecerão informações valiosas para entender melhor o setor de perfuração na região.

A seguir como resultado nas plataformas de pesquisa acadêmica é apresentado uma tabela síntese com as informações dos artigos selecionados que abordam o tema para fomentar a discussão.

Tabela 3. Tabela Síntese de artigos científicos que abordam métodos de perfuração

Nome	Região/Localidade	Geologia (Rochas)	Métodos de Perfuração	Fonte
Construção de poços tubular utilizando o método de perfuração por jato d' água: uma opção para as localidades isoladas e de difícil acesso na Amazônia	Amazônia	Sedimentar	Sondagem rotativa	Azevedo <i>et al.</i> (2005)
Métodos de perfuração e vazão dos poços tubulares profundos na área urbana de Cuiabá - MT	Cuiabá - MT	Metapelíticas	À percussão	Carvalho e Albrecht (2004)
Projeto básico poço tubular profundo	Espinilho Grande - RS	Basálticas	Rotopneumático	Nascimento (2022)
Laudo Hidrogeológico para construção de poço tubular no município de Soure/Pará	Soure - PA	Sedimentar	Rotativo	Negrão (2022)

Projeto básico. Implantação de poço tubular no município de Açailândia – MA	Açailândia - MA	Sedimentar	Rotativo	Prefeitura Municipal de Açailândia (2021)
Perfuração de poço tubular profundo	Campos Novos - SC	Basálticas e arenitos	Rotopneumático	Prefeitura Municipal de Campos Novos (2022)
Programas, projetos, ações públicas e gestão das águas no semi-árido: uma avaliação em Januária, MG	Januária - MG	Sedimentar	Rotativo	Araujo (2007)

Fonte: Autor (2023).

Foi observado que a busca por informações detalhadas sobre métodos de perfuração na banco de dados acadêmicos revelam uma notável escassez de estudos nesse tema e não somente na região Norte de Minas Gerais, mesmo com publicações mais recentes. Embora seja um tema amplamente abordado e aplicado por empresas em diversas indústrias, é surpreendente a falta de discussões e análises acadêmicas sobre o assunto.

Igualmente é possível observar nos artigos estudados da tabela síntese que o método escolhido de perfuração tem relação direta com a geologia. Sendo o método rotativo com bom rendimento pra rochas sedimentares. Rochas Basálticas foi utilizado o método rotopneumático e metapelíticas à percussão. Nesse sentido o estudo está de encontro com a bibliografia que indica as vantagens e desvantagens de cada método de acordo com a rocha perfurada.

Os artigos pesquisados abordam uma geologia diversificada:

- **Amazônia:** é amplamente caracterizada pela presença de rochas sedimentares. Como é um local de difícil acesso. O método de sondagem rotativa com sondas mecânicas se destaca como a opção mais recomendada para perfuração de poços tubulares nesta região. Pois oferece maior capacidade de adaptação aos diferentes tipos de solos sedimentares encontrados, e pelo fato de ser uma região de difícil acesso seus equipamentos podem ser ajustados para perfuração (Azevedo *et al.*, 2005).
- **Cuiabá/MT:** A região está localizada em uma área com rochas metapelíticas, que são rochas metamórficas formadas a partir de sedimentos argilosos, é importante destacar que o método de perfuração à percussão é especialmente indicado quando se lida com rochas mais compactas e resistentes (Carvalho e Albrecht, 2004).
- **Espinilho Grande/RS:** está localizada dentro da Formação Serra Geral é caracterizada por lavas basálticas e arenitos que sobre poem a Bacia do Paraná. O rotopneumático é o mais apropriado nessa região pois tem capacidade de lidar com diferentes tipos de materiais e as lavas basálticas podem ser rochas duras e resistentes, enquanto os arenitos são menos consolidados e mais permeáveis (Nascimento, 2022).

- **Soure/PA:** está inserido na bacia sedimentar do Amazonas, encontra-se em uma região com geologia sedimentar marcada pela presença de camadas de sedimentos depositados ao longo do tempo, portanto o método rotativo é mais eficiente para perfurar camadas de sedimentos (Negrão, 2022).
- **Açailândia/MA:** possui uma geologia sedimentar e está inserido na bacia do Paraná, o que implica a presença de diversas rochas sedimentares na região. Além disso, a área apresenta aquíferos porosos ou intergranulares, que são importantes reservatórios naturais de água subterrânea. O método rotativo com cisterna de lama é o que mais se adequa a essa região (Prefeitura Municipal de Açailândia, 2021).
- **Campos Novos/SC:** está localizada na Formação Serra Geral, na qual apresenta rochas basálticas de origem vulcânica, com características permeáveis que atuam como importantes aquíferos. Portanto o método rotopneumático é o mais indicado devido a resistência dessa rocha (Prefeitura Municipal de Campos Novos, 2022).
- **Januária/MG:** possui geologia sedimentar localizada na bacia do São Francisco. O método rotativo é eficiente, permitindo a perfuração através de diferentes tipos de rochas sedimentares, como arenitos, argilitos e calcários, que são comuns na região.

A escassez de artigos encontrados denota pouca adesão deste tema no meio acadêmico. Portanto, se faz necessário que a comunidade acadêmica reconheça sua importância. Estimular o debate e a produção de conhecimento nessa área e o desenvolvimento de soluções mais eficientes e sustentáveis em métodos de perfuração (Araújo, 2007).

5 CONCLUSÃO

Conclui-se que o método mais adequado de acordo com a geologia do Norte de Minas, com as pesquisas bibliográficas, e as pesquisas em empresas perfuradoras é o rotopneumático.

A metodologia empregada se mostrou eficiente para indicar o método de perfuração e atingir o objetivo do trabalho.

A concentração das empresas de perfuração na cidade de Montes Claros/MG se deve a fatores estratégicos, logísticos e econômicos e alta demanda por recursos hídricos. Sua localização central facilita o acesso a outras regiões, tornando-a uma escolha conveniente para empresas do setor.

A pesquisa contribuiu com informações relevantes para a gestão dos recursos hídricos na região, servindo como base para futuros estudos. A escassez de pesquisas representa uma oportunidade para aprimorar as técnicas existentes e desenvolver inovações no campo da perfuração.

Como trabalho futuro, sugere-se realizar uma pesquisa de campo com questionário direcionado aos perfuradores da região do Norte de Minas Gerais. A fim de fornecer informações diretamente dos profissionais que atuam na perfuração de poços profundos, enriquecendo o estudo com perspectivas e experiências fundamentais para a análise das técnicas utilizadas e suas adequações nos municípios. Os dados coletados contribuirão para o desenvolvimento de soluções mais eficientes de abastecimento de água, considerando a hidrogeologia local e as demandas da região.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. (2022). **As águas subterrâneas na política nacional de recursos hídricos**. Brasília: 220 p.: il. Capacitação em Gestão de Recursos Hídricos;
- ARAÚJO, V. M. Programas, projetos, ações públicas e gestão das águas no semiárido: uma avaliação em Januária, MG. 2007. 116 p. Dissertação (Mestrado em Administração) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12212: Projeto de poço para captação de água subterrânea**. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12244: Construção de poço para captação de água subterrânea**. Rio de Janeiro, 1992.
- ATMAN, D.; VELÁSQUEZ, L. N. M.; FANTINEL, L. M. CONTROLE ESTRUTURAL NA CIRCULAÇÃO E COMPOSIÇÃO DAS ÁGUAS NO SISTEMA AQUÍFERO CÁRSTICO-FISSURAL DO GRUPO BAMBUI, NORTE DE MINAS GERAIS. **Águas Subterrâneas**, [S. l.], v. 25, n. 1, 2011. DOI: 10.14295/ras.v25i1.21023. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/21023>. Acesso em: 01 jun. 2023.
- BORN, Cristiano R.; BARBOSA, Nazaré A.; STEIN, Ronei T.; et al. **Hidrogeologia**. [Digite o Local da Editora]: Grupo A, 2021. E-book. ISBN 9786556902449. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786556902449/>. Acesso em: 01 mar. 2023.
- CARVALHO, M. A. de; ALBRECHT, K. J. MÉTODOS DE PERFURAÇÃO E VAZÃO DOS POÇOS TUBULARES PROFUNDOS NA ÁREA URBANA DE CUIABÁ –MT. **Águas Subterrâneas**, [S. l.], n. 1, 2004. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23538>. Acesso em: 11 jul. 2023.
- CLIMATOLOGIA E HISTÓRICO DE PREVISÃO DO TEMPO EM JANAÚBA, BR. **CLIMATEMPO**, Minas Gerais, 2023. Disponível em: <<https://www.climatempo.com.br/climatologia/1089/janauba-mg>>. Acesso em: 29 de jun. de 2023.
- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – CPRM/Serviço Geológico do Brasil. Projeto Águas do Norte de Minas; PANM: Estudo da Disponibilidade Hídrica Subterrânea do Norte de Minas Gerais, relatório de integração. Belo Horizonte: **CPRM, 2019**. Disponível em <<http://www.cprm.gov.br/publique///Projetos/Projeto-Aguas-do-Norte-de-Minas---PANM-5664.html>>
- DE AZEVEDO, R. P.; ARAÚJO, M. de S.; JOVINAPE FILHO, A. R. CONSTRUÇÃO DE POÇO TUBULAR UTILIZANDO O MÉTODO DE PERFURAÇÃO POR JATO D'ÁGUA: UMA OPÇÃO PARA AS LOCALIDADES ISOLADAS E DE DIFÍCIL ACESSO NA AMAZÔNIA. **Águas Subterrâneas**, [S. l.], n. 1, 2005. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23202>. Acesso em: 11 jul. 2023.

EVANS, Luciene. In INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. Igam orienta produtores rurais para gestão das captações de recursos hídricos no Norte de Minas. **Portal Meio Ambiente.MG**, Minas Gerais 22 de jun. De 2023. Disponível em: <http://www.igam.mg.gov.br/banco-de-noticias/2898--igam-orienta-produtores-rurais-para-gestao-das-captacoes-de-recursos-hidricos-no-norte-de-minas>. Acesso em: 10 de jul. de 2023.

FEITOSA, F. A. C. et. Al. (Coords) 2008, **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. 3ª Ed CPRM, 812p.

GONÇALES, V. G.; GIAMPÁ, C. E. (Editores) **Águas Subterrâneas e Poços Tubulares Profundos**. São Paulo: Signus Editora, 2006.

INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO DO NORTE E NORDESTE DE MINAS GERAIS. **Plano Integrado de desenvolvimento do Norte e Nordeste. Minas Gerais**, 2021. Disponível em: <http://www.idene.mg.gov.br/images/documentos/Plano%20Integrado%20Norte%20e%20Nordeste%20%20PPT%20-%202008.06.2021%20-%20PDF.pdf>

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Manual Técnico e Administrativo de Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos no Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Igam, 2010. 113 p.

LIMA, L. A. **Caracterização Hidrogeoquímica Para Monitoramento da Qualidade de Aquíferos Costeiros**. 2019. p.13. Programa de Pós-Graduação em Geociências – Universidade Federal Fluminense.

LUIZ GOMES ZOBY, J.; ANTUNES MATOS, B.; LOTUFO CONEJO, J. G. DISPONIBILIDADE DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO. **Águas Subterrâneas, [S. l.]**, n. 1, 2004. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23452>. Acesso em: 15 jul. 2023.

NASCIMENTO, F. M. B. Projeto Básico Poço Tubular Profundo. **GEOSUL**, Rio Grande do Sul nov. de 2022. Disponível em: https://tupancireta.rs.gov.br/uploads/edital/36270/Prego_74_Projeto_Bsico.pdf. Acesso em: 10 de jul. de 2023

NEGRÃO, L. O. S. **Laudo Hidrogeológico Para Construção de Poço Tubular no Município de Soure/Pará**. Pará, maio de 2021. Projeto Básico. Disponível em: <https://soure.pa.gov.br/wp-content/uploads/2023/03/LAUDO-SourePacoval.pdf>. Acesso em: 10 de jul. de 2023.

PREFEITURA MUNICIPAL DE AÇAILÂNDIA -MA. Implantação de Poço Tubular no Município de Açailândia - MA. **SECRETARIA MUNICIPAL DE PLANEJAMNETO**, Maranhão nov. de 2021. Projeto Básico. Disponível em: <https://acailandia.ma.gov.br/arquivos/licitacoes/2021/Novembro/724d846a1144b0c4e6cc13304f7cac2b-PROJETO-BASICO-TP-003-2021-POCO-ARTESIANO.pdf>. Acesso em: 10 de jul. de 2023.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CAMPOS NOVOS- SC. **Perfuração de Poço Tubular Profundo**. Santa Catarina, 2022. Disponível em: https://camposnovos.sc.gov.br/uploads/sites/405/2022/06/32909_0.657699001341939828_memorial_completo_2.pdf. Acesso em: 10 de jul. de 2023.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CAMPOS NOVOS- SC. **Perfuração de Poço Tubular Profundo.** Santa Catarina, 2022. Disponível em: https://camposnovos.sc.gov.br/uploads/sites/405/2022/06/32909_0.657699001341939828_memorial_completo_2.pdf. Acesso em: 10 de jul. de 2023.

SANTOS, A.C. **Noções de hidroquímica.** In: Feitosa, F.A.C.; Manoel Filho, J. (Org.).

SILVA, S. M. da; VELÁSQUEZ, L. N. M.; FREITAS, A. M.; PEREIRA, C.; COSTA, D. A.; SOARES, L. C.; FANTINEL, L. M.; FLEMING, P. M.; RODRIGUES, P. C. H. **HIDROQUÍMICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E ANOMALIAS DE FLUORETO EM REGIÃO DO SEMI-ÁRIDO MINEIRO. Águas Subterrâneas, [S.l.], 2008. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23854>. Acesso em: 06 jun. 2023.>**

SOUZA, M. F. B.; OLIVEIRA, S. C.; PAIXÃO M. M. O. M.; HAUSSMANN. Aspectos Hidrodinâmicos e Qualidade das Águas Subterrâneas do Aquífero Bambuí no Norte de Minas Gerais. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Volume 19 n.1 –Jan/Mar 2014, 119-129 Acesso em: 10 de jul. de 2023.

SANTOS, A.C. **Noções de hidroquímica.** In: Feitosa, F.A.C.; Manoel Filho, J. (Org.).

SILVA, S. M. da; VELÁSQUEZ, L. N. M.; FREITAS, A. M.; PEREIRA, C.; COSTA, D. A.; SOARES, L. C.; FANTINEL, L. M.; FLEMING, P. M.; RODRIGUES, P. C. H. **HIDROQUÍMICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E ANOMALIAS DE FLUORETO EM REGIÃO DO SEMI-ÁRIDO MINEIRO. Águas Subterrâneas,[S.l.], 2008. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23854>. Acesso em: 06 jun. 2023.>**

SOUZA, M. F. B.; OLIVEIRA, S. C.; PAIXÃO M. M. O. M.; HAUSSMANN. Aspectos Hidrodinâmicos e Qualidade das Águas Subterrâneas do Aquífero Bambuí no Norte de Minas Gerais. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Volume 19 n.1 –Jan/Mar 2014, 119-129

ESTUDO SOBRE METODOLOGIAS DE MAPEAMENTO DE VULNERABILIDADE DE AQUIFEROS EM REGIÕES DE CLIMA SEMIÁRIDO

  10.56238/livrosindi202529-008

Luiz Thiago Santos Teixeira

Bacharel em Ciência e Tecnologia - UFVJM
Discente do curso de Engenharia de Minas - UFVJM
E- mail: luiz.thiago@ufvjm.edu.br

Jonatas Franco Campos da Mata

Engenheiro de Minas - UFMG
Mestre em Ciência e Tecnologia de Radiações, Minerais e Materiais - CDTN
Doutor em Engenharia de Minas, Tecnologia Mineral - UFMG
Professor Adjunto do curso de Engenharia de Minas da UFVJM
E- mail: jonatas.mata@ufvjm.edu.br

Jheimisson Luiz Santos

Bacharel em Ciência e Tecnologia, Engenheiro de Alimentos - UFVJM
Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos - UFVJM
E- mail: jheimisson.luiz@ufvjm.edu.br

Juliana Magalhães Meneses

Geógrafa, Licenciatura e Bacharelado – UERJ
Mestre e Doutora em Geociências - UFRJ
Professora Associada do Departamento de Análise Geoambiental da UFF
Co-orientadora deste trabalho
E- mail: juliana_menezes@id.uff.br

Luana Alves de Lima

Geóloga e Mestre em Geologia – UFRJ
Doutora em Geociências, Geoquímica – UFF
Professora Adjunta do curso de Engenharia de Minas da UFVJM
Orientadora deste trabalho
E- mail: luana.lima@ufvjm.edu.br

RESUMO

Este estudo aborda as metodologias utilizadas para o mapeamento da vulnerabilidade de aquíferos em regiões de clima semiárido. Devido à escassez de água e à alta variabilidade climática, os aquíferos nestas regiões desempenham um papel crucial no abastecimento hídrico. Para identificar a vulnerabilidade de aquíferos existem diversos métodos para realizar o mapeamento, sendo alguns deles os métodos: GOD, DRASTIC E COP, que foram utilizados como objetos de estudo nesse trabalho. A pesquisa explora essas diferentes metodologias de avaliação e mapeamento da vulnerabilidade, com o objetivo de estudar e entender a importância de tais metodologias de forma que possam ser utilizadas como ferramenta de proteção das águas subterrâneas. Foram analisados artigos que pesquisados nas plataformas Google Acadêmico e Periódicos da Capes utilizando as palavras chaves: “Vulnerabilidade de aquíferos”, “clima semiárido”, “qualidade da água”, “água subterrânea” nos últimos 20 anos. Foram selecionados 11 trabalhos aplicados em diversas regiões semiáridas, para a confecção de uma tabela síntese, permitindo uma compreensão aprofundada das variáveis que são levadas em consideração para o mapeamento de vulnerabilidade dos aquíferos. Os artigos utilizados para a composição dessa tabela síntese demonstrou que o método mais utilizado em regiões de clima semiárido, é o GOD, devido a sua simplicidade, custo e eficácia. Também foi possível compreender que existem fatores nos quais esses métodos baseiam-se para realizar o

mapeamento de vulnerabilidade dos aquíferos, e que também algumas adaptações podem ser feitas de forma paralela à aplicação da metodologia para obter uma melhor precisão dos resultados como: solo, geologia e clima, que se mostraram predominantes e frequentes nos artigos selecionados. Os resultados destacam a importância de um mapeamento preciso e integrado para a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos, propondo recomendações para políticas públicas e estratégias de conservação. Este trabalho contribui para o aprimoramento das metodologias existentes e oferece uma base científica para futuras pesquisas e aplicações práticas em regiões semiáridas.

Palavras-chave: Vulnerabilidade de aquíferos, Clima semiárido, Qualidade da água, Água subterrânea.

1 INTRODUÇÃO

A água subterrânea é uma das principais fontes de abastecimento de água potável em diversas regiões do mundo, especialmente em regiões de clima semiárido, onde a disponibilidade de água superficial é limitada. A proteção da qualidade da água subterrânea torna-se, portanto, uma questão crítica para garantir a sustentabilidade dos recursos hídricos e a saúde das populações dependentes desse recurso. Segundo Foster *et al.* (2006), em seu livro "Proteção da Qualidade da Água Subterrânea" existem diversas metodologias e práticas utilizadas para proteger e gerenciar a qualidade das águas subterrâneas tais como: proteção de fontes de recarga, cadastro de cargas contaminantes, avaliação de risco de contaminação e por fim mapeamento da vulnerabilidade dos aquíferos, tema do presente trabalho.

Em regiões de clima semiárido, os aquíferos estão frequentemente sob pressão, devido às atividades antrópicas, como a agricultura intensiva, o uso de pesticidas e fertilizantes, e o descarte inadequado de resíduos (Feitosa, 2008). Essas práticas podem levar à contaminação dos aquíferos, comprometendo a qualidade da água e, conseqüentemente, a saúde pública e os ecossistemas locais. Compreender a vulnerabilidade dos aquíferos em tais regiões é essencial para desenvolver estratégias eficazes de gestão e proteção. Como exemplo de regiões que necessitam de gestão adequada de recursos hídricos subterrâneos pode-se citar o Norte de Minas Gerais. Segundo Santos (2023), esta região está extremamente propensa a ocorrências de seca e há necessidade de manutenção do suprimento hídrico para atender as demandas da agricultura e outras atividades econômicas onde a perfuração de poços tem destaque. Segundo este autor, os dados demonstram que o segundo município que mais perfura poços, seguido de Montes Claros é Janaúba. Dentre os fatores que podem justificar o protagonismo de Janaúba na utilização de poços profundos é crescimento populacional registrado no último censo, a implantação de um complexo de energia fotovoltaica que atrai diversos setores da economia, e atividades agrícolas com destaque a produção de banana.

Haja vista que os aquíferos são estratégicos em tais regiões de clima semiárido supracitadas, os estudos de metodologias de mapeamento de vulnerabilidade que se adequem a estas regiões se fazem necessárias como instrumento de gestão.

Segundo Hirata e Fernandes (2008) os encarregados pela gestão dos recursos hídricos estão cada vez mais conscientes das limitações técnicas, econômicas e de disponibilidade de especialistas para viabilizar a remediação de contaminações existentes nos aquíferos. Esta situação recorrente tem mostrado que pode ser muito mais interessante proteger o aquífero do que remediá-lo. Dessa forma, tem-se notado a popularização do uso e do próprio desenvolvimento de técnicas de mapeamento de vulnerabilidade à contaminação de aquíferos, como uma ferramenta para a proteção dos recursos hídricos subterrâneos.

Sendo assim, o presente estudo tem como objetivo analisar metodologias de avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos em regiões de semiárido, utilizando como base teórica e metodológica a busca por bibliografias, artigos e teses que aplicam esse tema em regiões de clima semiárido e no Norte de Minas Gerais.

A abordagem metodológica deste estudo inclui a análise de parâmetros hidrogeológicos, a avaliação de fontes potenciais de contaminação e a aplicação de modelos de vulnerabilidade, que são discutidos na literatura de acordo com a geologia, clima e realidade local.

Dessa forma, este estudo pretende não apenas ampliar o conhecimento sobre a vulnerabilidade dos aquíferos em regiões de semiárido, mas também fornecer subsídios para a possibilidade de futura aplicação desta ferramenta na região.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

2.1 OCORRÊNCIA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Tem-se, como definição de água subterrânea, aquela que advém abaixo do nível de saturação ou nível freático, presente nas formações geológicas mais rasas e parcialmente saturadas, e nas formações geológicas profundas completamente saturadas (Filho, 2008).

Segundo Foster *et al.*, (2006), a água subterrânea é um recurso natural essencial para o suprimento econômico e seguro de água potável nos meios urbano e rural, além de exercer papel substancial para o bem-estar tanto dos seres humanos, assim como de muitos ecossistemas aquáticos.

Filho (2008) salienta que, mesmo que toda a água localizada abaixo da superfície da Terra seja claramente subterrânea, na hidrogeologia a definição de água subterrânea é relacionada somente à água que ocorre na zona saturada, ou seja, na zona situada abaixo da superfície freática.

Para Foster *et al.*, (2006), os aquíferos são, de forma sucinta, formações geológicas que contêm água subterrânea adequada para o consumo.

Caracteriza-se aquífero a uma formação geológica que possui água em seu interior, e possibilita que quantidades significativas dessa água se movimentem em condições naturais (Filho, 2008).

Em relação aos tipos de aquíferos, segundo Chambel (2011), levando em consideração a localização de onde estão armazenadas, as águas subterrâneas podem ser encontradas em três tipos de aquíferos com características distintas que os definem como:

- **Aquíferos em meios porosos ou sedimentares:** ocorrem em litologias típicas de rochas sedimentares não consolidadas (de granulometria areias) ou em rochas sedimentares do mesmo tipo, porém já com algum grau de litificação que não lhes retire o seu caráter poroso. Um exemplo deste tipo de aquífero é o nomeado Aquífero Guarani transfronteiriço.
- **Aquíferos em meios fraturados ou cristalinos:** ocorrem em litologias fundamentalmente ígneas e metamórficas. A característica principal deste tipo de aquífero é que a transmissão da água ocorrer primordialmente através de fraturas, fissuras, fendas e descontinuidades da rocha maciça na qual é a chamada de porosidade secundária.
- **Aquíferos em meios cársticos:** podem ser considerados um tipo de aquífero fraturado, porém com uma característica específica: as fraturas, nas quais ocorrem o fluxo principal, são alargadas por dissolução, podendo atingir dimensões muito grandes (cavernas, canais, dolinas e grutas, por exemplo). Este tipo de aquífero surge em rochas carbonáticas afetadas por fenômenos de dissolução química, geralmente calcários e dolomitos (Chambel, 2011).

Ainda em relação aos tipos de aquíferos, segundo Filho (2008), estes podem ser classificados de acordo com a pressão da água nas suas superfícies limítrofes (superior, chamada topo, e inferior, chamada base) e, também, em função da capacidade de transmissão de água dessas respectivas camadas limítrofes (do topo, camada confinante superior e da base, camada confinante inferior). Em relação à pressão nas superfícies limítrofes, os aquíferos podem ser classificados em confinantes e livres.

Aquíferos confinados também chamados de aquíferos sob pressão, são aqueles onde a pressão da água em seu topo é maior do que a pressão atmosférica. Em função das características das camadas limítrofes, podem ser definidos como: confinados não drenantes e confinados drenantes.

- **Aquíferos Confinados não Drenantes:** são aquíferos cujas camadas limítrofes, superior e inferior, são impermeáveis. Em um poço que penetra num aquífero desse tipo, o nível da água subterrânea fica acima da base da camada confinante superior.
- **Aquíferos Confinados Drenantes:** são aqueles, onde pelo menos uma das camadas limítrofes é semipermeável, permitindo a entrada ou saída de fluxos pelo topo e/ou pela base, através de

drenagem ascendente ou descendente. As formações semipermeáveis oferecem uma resistência hidráulica relativamente alta à passagem do fluxo de água através delas. Mesmo assim, quantidades consideráveis de água podem ser perdidas ou ganhas pelos aquíferos drenantes de grande extensão global.

Aquíferos livres, também chamados de freáticos ou não confinados, são aqueles cujo limite superior é a superfície de saturação ou freática na qual todos os pontos se encontram à pressão atmosférica. As áreas de recarga dos aquíferos confinados correspondem a aquíferos livres através dos quais os excessos de água da chuva conseguem penetrar por infiltração. A exemplo dos aquíferos confinados, os aquíferos livres também se classificam em drenantes (ou de base semipermeável) e não drenantes (ou de base impermeável).

Existe ainda, um caso especial de aquífero livre, denominado de aquífero suspenso, quando é formado sobre uma camada impermeável ou semipermeável de extensão limitada e situada entre a superfície freática regional e o nível do terreno. Esses aquíferos às vezes existem em caráter temporário, na medida em que drenam para o nível freático subjacente.

Abaixo da superfície do terreno, a água contida no solo e nas formações geológicas é dividida ao longo da vertical basicamente em duas zonas horizontais, saturada e não saturada, de acordo com a proporção relativa do espaço poroso que é ocupado pela água (Filho, 2008):

- **Zona saturada:** fica situada abaixo da superfície freática e nela todos os vazios existentes no terreno estão preenchidos com água. A superfície freática é definida como o lugar geométrico dos pontos em que a água se encontra submetida à pressão atmosférica. É uma superfície real na qual a pressão de referência é $p=0$.
- **Zona não saturada:** também conhecida como zona vadosa, situa-se entre a superfície freática e a superfície do terreno e nela os poros estão parcialmente preenchidos por gases (principalmente ar e vapor d'água) e por água.

2.2 VULNERABILIDADE DE AQUÍFERO

A vulnerabilidade de aquíferos apresenta-se como ferramenta de gestão para determinar áreas mais ou menos suscetíveis a contaminação com o objetivo principal de proteção da água subterrânea.

Segundo Foster *et al.*, (2006) o mapeamento da vulnerabilidade do aquífero à contaminação geralmente é o primeiro passo na avaliação do perigo de contaminação da água subterrânea e na proteção de sua qualidade, em escala municipal ou estadual.

Vale salientar que segundo este autor, os mecanismos de recarga da água subterrânea e a capacidade natural de atenuação do contaminante no solo e subsolo variam amplamente segundo as condições geológicas próximas à superfície. Sendo assim ao invés de aplicar controles universais sobre o uso do solo e as emissões de efluentes potencialmente contaminadores, poderá valer mais a pena, em termos de custo, aplicar metodologias de susceptibilidade à contaminação e a capacidade de atenuação. Desta premissa origina-se o conceito de vulnerabilidade do aquífero à contaminação e a necessidade do mapeamento como uma útil ferramenta de gestão.

A vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação pode ser definida em função de um conjunto de características físicas, químicas e biológicas da zona não saturada e/ou do aquífero confinante que, juntas, controlam a chegada do contaminante ao aquífero (Hirata e Fernandes, 2008).

O termo vulnerabilidade pode ser compreendido como a suscetibilidade intrínseca do meio aquífero ao ser afetado por uma carga contaminante antrópica e está diretamente relacionado com as características do meio físico. Segundo Hirata e Fernandes (2008), na literatura o termo vulnerabilidade recebe vários adjetivos de acordo com o objetivo do mapeamento que serão apresentados a seguir:

- **Vulnerabilidade Relativa** - as unidades de um mapa de vulnerabilidade são classificadas uma com relação à outra e não possuem significado absoluto;
- **Vulnerabilidade Absoluta** - cada unidade mapeada possui um significado em si, ou seja, cada índice de vulnerabilidade seria associado à capacidade de degradação de um contaminante ou grupo de contaminantes;
- **Vulnerabilidade Geral ou Universal** - dirige-se a todas as atividades ou classes de contaminantes; e incluindo a compatibilização de mapas gerados em diferentes etapas ou com métodos distintos.
- **Vulnerabilidade Específica** - volta-se a um certo contaminante ou ainda atividade ou classe de contaminantes.

Como exemplo a seguir, são apresentadas na figura 1 as diversas classes de vulnerabilidade absoluta de aquíferos que o mapeamento pode apresentar de acordo com os contaminantes.

Vale ressaltar que esta etapa metodológica de determinação da vulnerabilidade hidrogeológica para Foster *et al.* (2008), é premissa fundamental para determinação da avaliação de perigo de contaminação da água subterrânea.

Este autor considera que o perigo de contaminação de um aquífero num dado local pode ser determinado considerando-se a interação entre: a carga contaminante que é, ou poderá ser aplicada no subsolo como resultado de atividades humanas versus a vulnerabilidade do aquífero à

contaminação, que como já exemplificado anteriormente, depende das características naturais dos extratos que o separam da superfície do solo.

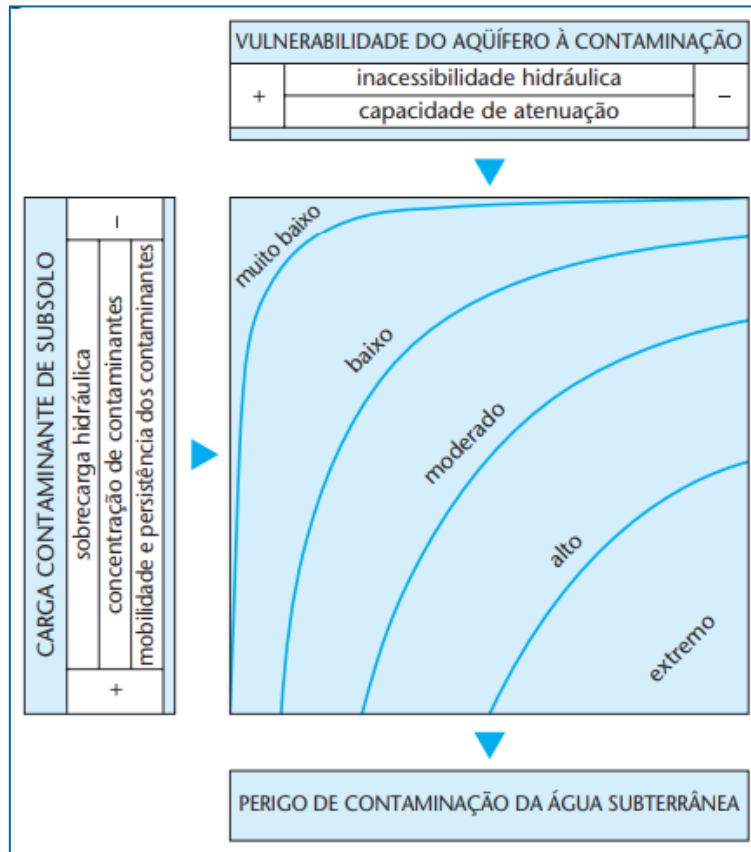
Figura 1. Classes de Vulnerabilidade Absoluta de Aquíferos

Classes de Vulnerabilidade	Definição Prática	Exemplos de Compostos Contaminantes
Extrema	Vulnerabilidade a muitos poluentes, incluindo os rapidamente degradáveis em muitos cenários de contaminação	
Alta	Vulnerável a muitos poluentes, exceto aqueles muito pouco móveis e pouco persistentes	
Moderada	Vulnerável a alguns poluentes, e somente quando continuamente lançados	
Baixa	Somente vulnerável a contaminantes conservativos em longo prazo, quando continuamente e amplamente lançados	
Negligenciável	Não vulnerável, exceto em locais restritos que permitam o fluxo vertical (Ex: zonas de fraturas)	

 Pesticidas catiônicos, metais pesados não associados à elevada carga orgânica ou em condições de pH e Eh extremados.
 Bactérias e vírus e compostos aromáticos
 Hidrocarbonetos clorados e não-clorados
 Sais e nitrato
 Sais e nitrato quando hidraulicamente possível

Fonte: Foster (1998); Foster *et al.* (2002) apud Fernandes e Hirata (2008).

Figura 2. Avaliação do perigo de contaminação da água subterrânea



Fonte: Foster *et al.*, (2006).

Analisando o esquema conceitual da figura 2, uma atividade apresentaria um grande perigo se estivesse localizada em um aquífero de alta vulnerabilidade. Em contrapartida, a ausência de uma atividade geradora de carga contaminante, ou mesmo a sua localização em regiões de baixa vulnerabilidade indicaria abaixo risco ou até mesmo a inexistência de perigo do tipo de atividade em questão.

Os itens a seguir descrevem alguns dos principais métodos de mapeamento de vulnerabilidade de aquíferos, encontrados na literatura.

2.2.1 Método GOD

O método GOD de avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação foi amplamente testado na América Latina e no Caribe durante a década de 1990 e, graças a sua simplicidade conceitual e de aplicação, é um dos métodos mais utilizados criados por Foster (1987) e Foster e Hirata (1988):

A sua denominação é um acrônimo dos três seguintes fatores em inglês:

- ***Groundwater hydraulic confinement***: Confinamento do aquífero, que significa grau de confinamento da água subterrânea, confere a sigla G do método.
- ***Overlying strata***: Natureza composicional da zona não saturada e/ ou aquífero e seu grau de fraturamento que pode ser compreendida pela ocorrência de estratos de cobertura e as características litológicas e grau de consolidação da zona vadosa ou camada confinante, confere a sigla O do método;
- ***Depth to groundwater table***: Profundidade do nível d'água ou da base da camada confinante do aquífero, que pode ser compreendido como a distância até o lençol freático ou o teto do aquífero confinado. Confere a sigla D do método.

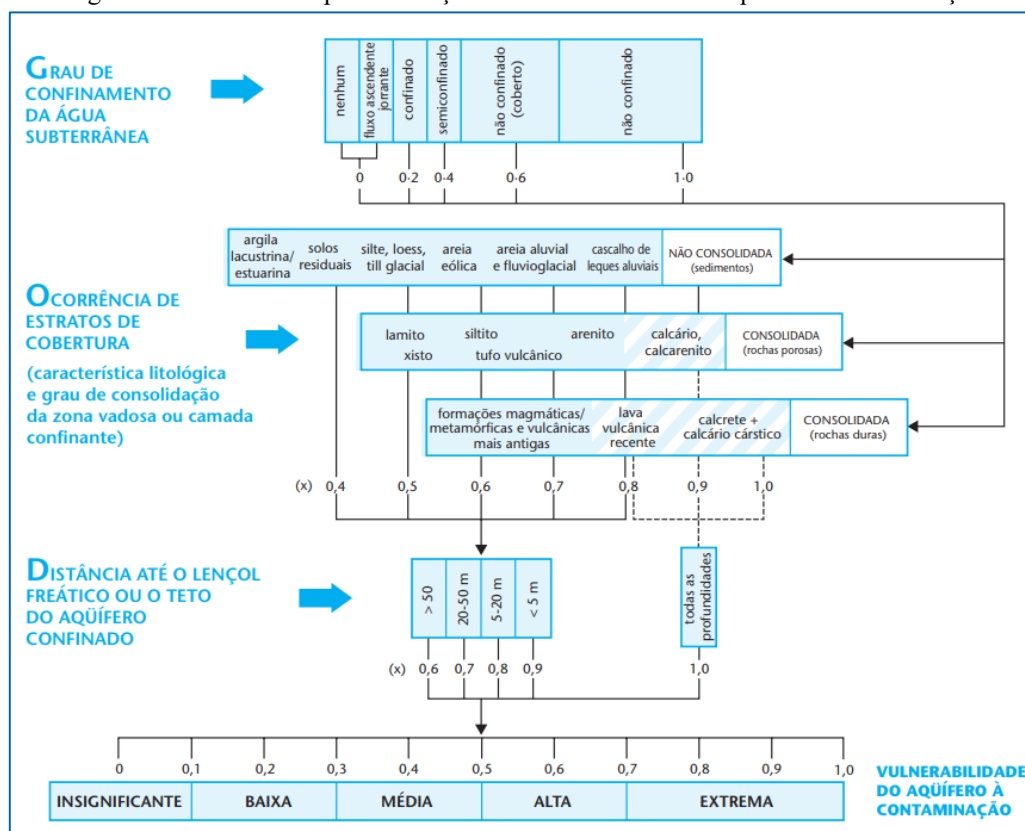
Para cada um destes fatores existe uma gradação de 0 ou 0,3 a 1,0, que, multiplicados entre si, definem o grau de vulnerabilidade do aquífero (Hirata e Fernandes, 2008).

Segundo Foster *et al.*, (2006), dois fatores básicos são levados em consideração para determinar a vulnerabilidade do aquífero à contaminação, e são eles:

- O nível de inacessibilidade hidráulica da zona saturada do aquífero
- A capacidade de atenuação dos estratos de cobertura da porção saturada do aquífero

A principal vantagem da utilização desse método é a facilidade de aquisição dos fatores na análise de determinação da vulnerabilidade. A Figura 3 a seguir demonstra o Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação.

Figura 3. Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação



Fonte: Foster *et al.*, (2006)

2.2.2 Método DRASTIC

O método DRASTIC (Aller *et al.* 1987) é o modelo de vulnerabilidade mais popular na Europa e Estados Unidos. Este método gera um índice relativo de vulnerabilidade que é obtido pela soma ponderada de sete parâmetros. Tal qual o método elucidado no item anterior, a sua denominação é igualmente acrônimo dos seguintes fatores em inglês:

- I. **Deth:** Profundidade do nível da água
- II. **Recharge:** Recarga natural
- III. **Aquifer Media:** Meio aquífero
- IV. **Soil Media:** Solo
- V. **Topography:** Topografia (declividade)
- VI. **Impacto of vadoze zone:** Impacto da zona vadosa
- VII. **Conductivity Hydraulic:** Condutividade hidráulica da zona saturada.

Foster *et al.*, (2006) salienta que DRASTIC o foi objeto de diversas avaliações, onde foram apontados benefícios assim como inúmeras insuficiências dessa metodologia. No geral, considera-se que o método tende a gerar um índice de vulnerabilidade de importância bastante vaga devido ao excesso de parâmetros ponderados, alguns dos quais apresentam forte correlação e sobreposição.

2.2.3 Método COP

A metodologia COP desenvolvida por Vías *et al.*, (2002, 2006), foi originalmente criada para aplicação em regiões de clima semiárido na Espanha. Essa metodologia tem sido utilizada em diversos países, com bons resultados quando comparado com outras metodologias de vulnerabilidade intrínseca de aquíferos. Este método é um dos mais utilizados mundialmente para aquíferos cársticos.

Em geral, os aquíferos cársticos são considerados de alta vulnerabilidade e a qualidade de sua água depende basicamente da composição química da rocha, tipicamente calcária, e dos fatores climatológicos e estruturais, além das atividades humanas (SOUSA, 2020).

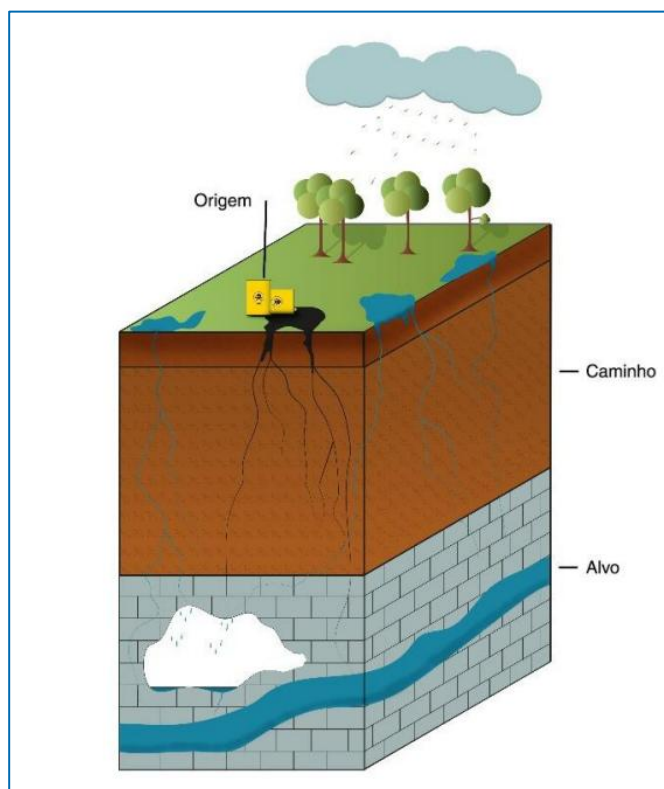
Se tratando de aquíferos cársticos, a zona vadosa é muito mais efetiva no processo de atenuação de poluentes que a zona saturada, devido aos processos microbiológicos e físico-químicos. Isto ocorre por que o sistema de fissuras das rochas calcárias facilita a rápida penetração dos poluentes no aquífero (FRISTZSONS *et al.*, 2001 *apud* SOUSA, 2020).

Sendo assim, método COP, utiliza para avaliação da vulnerabilidade intrínseca em aquíferos cársticos, a abordagem COST Action 620 (Figura 4), usando as propriedades das camadas sobrepostas acima da zona saturada (Fator O), a concentração de fluxo (Fator C) e a precipitação (Fator P).

Esse método considera as características cársticas, bem como a presença de dolinas e sumidouros, onde as mesmas desempenham importante papel na infiltração de potenciais contaminantes em subsuperfície, declividade do terreno e vegetação, reunidos no “Fator C”. O “Fator P” possibilita considerar através da variabilidade temporal e espacial o transporte de contaminantes para dentro do aquífero. Já as características de infiltração (concentrada via sumidouro e/ou dolina) diminuem a proteção natural dada pelas camadas que se sobrepõem ao aquífero (Fator O), haja vista que é na infiltração difusa que se dão os processos de atenuação natural por meio das características físico-químicas do solo (SOUSA 2020).

São estabelecidos índices de vulnerabilidade correspondentes a cada classe de vulnerabilidade. Esses índices se dividem em cinco classes de variação (alta, muito alta, moderada, baixa e muito baixa), variando em intervalos de 0 a 15, com vulnerabilidade crescente nessa ordem (VÍAS *et al.*, 2006).

Figura 4. Modelo conceitual estabelecido pela COST Action 620 para determinação da vulnerabilidade da água subterrânea em aquíferos cársticos.



Fonte: (Souza, 2020)

3 MATERIAIS E METODOS

Na confecção deste trabalho realizou-se pesquisas bibliográficas no portal de periódicos da capes e no google acadêmico. As palavras chaves utilizadas foram: “Vulnerabilidade de aquíferos”, “clima semiárido”, “qualidade da água”, “água subterrânea”. O período de aquisição foi nos últimos 20 anos.

Após esta etapa os artigos foram selecionados de acordo com sua relevância e contribuição para o tema, os mesmos foram utilizados para composição da tabela síntese contendo os principais trabalhos que aplicaram metodologias de mapeamento de vulnerabilidade de regiões com clima semiárido ou semelhantes.

Para confecção da tabela síntese foram selecionadas dos artigos as informações de: localização da bacia hidrográfica, método de vulnerabilidade de aquífero empregado, parâmetros utilizados, classes de vulnerabilidade e autores do trabalho.

4 RESULTADOS

Com base nos artigos selecionados que realizaram a aplicação dos métodos já citados para mapeamento de vulnerabilidade de aquíferos em regiões de clima semiárido, foi confeccionada a tabela, representada a seguir.

Tabela 1 - Bacias hidrográficas que aplicaram métodos de mapeamento de vulnerabilidade de aquíferos em regiões de clima semiárido ou semelhante.

BACIA HIDROGRÁFICA/ LOCALIZAÇÃO	MÉTODO	FATORES DO MAPEAMENTO	CLASSES DE VULNERABILIDADE	FONTE
Águas subterrâneas do município de Claro dos Poções/MG	Método GOD	G tipo de aquífero O litologia zona vadosa D profundidade de água	Baixa: 7,8% Média: 62,6% Alta: 27% Extrema: 2,6%	Gorayski (2021)
Região semiárida da Bahia, município de Tucano	Método GOD	G tipo de aquífero O litologia zona vadosa D profundidade de água	Insignificante: 1,28% Baixa: 71,99% Média: 23,9% Alta: 2,94%	Nascimento <i>et al.</i> , (2019)
Sub-bacia urbana na cidade de Fortaleza	Método GOD	G tipo de aquífero O litologia zona vadosa D profundidade de água	Não identificado	Peixoto (2019)
Aquífero cárstico Salitre, Irecê/BA, Brasil	Método COP-Solo	C concentração de fluxo As propriedades das camadas sobrepostas acima da zona saturada P precipitação	Método COP original: Muito baixa: 64,88% Baixa: 28,55% Moderada: 6,11 Alta: 0,42% Muito alta: 0,04% Método COP-Solo: Muito baixa: 0,29% Baixa: 38,19% Moderada: 44,29% Alta: 11,30% Muito alta: 5,93%	Villanueva <i>et al.</i> , (2015)
Vale do Riacho Mimoso	Método GOD	G tipo de aquífero O litologia zona vadosa D profundidade de água	A área em estudo apresenta alta vulnerabilidade à contaminação segundo investigação preliminar efetuada.	Almeida <i>et al.</i> , (2006)
Caetitê-BA	Método GOD	G tipo de aquífero O litologia zona vadosa D profundidade de água	Insignificante: 2% Baixa: 4% Média: 66% Alta: 4,0%	Paes (2017)
Campo Formoso/BAHIA	Método GOD	G tipo de aquífero O litologia zona vadosa D profundidade de água	Na parte sudoeste, noroeste e nordeste apresentam vulnerabilidades insignificante e baixa, enquanto que na parte centro-sul e sudeste indicam índices de vulnerabilidade média e alta.	Brito <i>et al.</i> , (2013)
Bacia do Rio Itapicuru/Bahia	Métodos GOD E DRASTIC	G tipo de aquífero O litologia zona vadosa D profundidade de água	Setor 1 predominam as classes de vulnerabilidade alta e média. Setor 2 uma extensa área reflete a condição de vulnerabilidade média. Setor 3 a classe varia de baixa a média. Setor 4, o resultado de vulnerabilidade alta e extrema Os setores 1 (alto), 2 (médio) e 3 (sub médio) da bacia.	Mestrinho <i>et al.</i> , (2006)
Aquíferos livres em região hidrográfica do semiárido baiano	Método GOD	G tipo de aquífero O litologia zona vadosa D profundidade de água	Média: 4% Alta: 96%	Oliveira <i>et al.</i> , (2013)

Sub-bacias baianas	Métodos GOD e POSH	G tipo de aquífero O litologia zona vadosa D profundidade de água Avaliação de perigo á contaminação	Insignificante: 0,07% Baixa: 9% Média: 85,5% Alta: 5,2% Extrema: 0,25%	Rios e Rabelo (2021)
Aquíferos livres de Campos dos Goytacazes	Método DRASTIC	D profundidade água subterrânea R recarga A meio aquífero S solo T topografia I impacto no aquífero C condutividade hidráulica	A vulnerabilidade de todo Município variou de baixa a extrema. Para a região dos sedimentos de Formação Barreiras, as áreas variam de alta e moderada vulnerabilidade.	Alves <i>et al.</i> , (2009)

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Em relação às bacias hidrográficas onde as metodologias e regiões pesquisadas, onde foram aplicados os métodos de vulnerabilidade de aquíferos, é possível observar que em sua maioria ocorrem no estado da Bahia. Vale ressaltar que Campos dos Goytacazes/RJ, uma exceção, se localiza em uma região que apresenta um índice de aridez crescente e índice de umidade decrescente nos últimos anos, resultando em déficit hídrico, o que dá esta a região característica de clima semiárido. Dessa forma, o artigo foi incluído para fomentar a discussão e por ter características de semiárido, dentro do contexto desta pesquisa. Um fator importante nas regiões e bacias hidrográficas é a geologia, onde a maioria são formadas por aquíferos fraturados e cársticos, com exceção de Campos dos Goytacazes (Alves *et al.*, 2009), Bacia do Rio Itapicuru/BA (Mestrinho *et al.*, 2006).

Dos onze artigos estudados, percebe-se que o método mais utilizado foi o GOD, segundo os autores, isso se deve a sua simplicidade, custo e eficácia para identificar a vulnerabilidade de aquíferos cársticos e demais. O método DRASTIC e o método COP também foram utilizados, no entanto com uma frequência bem menor quando comparado à utilização do método GOD. Os autores Almeida *et al.*, (2013) que aplicou a metodologia em Vale do Riacho Mimoso, complementaram o método com dados piezométricos de poços e dados hidrogeoquímicos. Os autores Villanueva *et al.*, (2015), utilizaram o método COP adaptado (COP-Solo), na região Aquífero Cárstico Salitre, no Irecê/BA. Tais autores consideraram o solo da região como fator de atenuação intrínseca da vulnerabilidade de aquíferos. Isso se deve às camadas de solo existentes, adaptando o método para o Brasil que possui diferenças no clima e na geologia em relação ao método original criado. Essa adaptação gerou uma mudança significativa nas classes de vulnerabilidade do aquífero estudado.

Entre os artigos estudados no clima semiárido, os aquíferos livres da bacia hidrográfica do semiárido baiano, estudados pelos autores Oliveira *et al.*, (2013) apresentam os aquíferos com maiores índices de vulnerabilidade, possuindo 96% definidos como alta vulnerabilidade pelo método GOD, em contrapartida os autores Nascimento *et al.*, (2019) classificaram os aquíferos da região semiárida da Bahia, município de Tucano, como baixa em 71,99%, utilizando também o método GOD para o

mapeamento de vulnerabilidade. Já no aquífero cárstico Salitre, Irecê – BA, onde os autores Villanueva *et al.*, (2015) utilizaram o método COP original e adaptado (COP – Solo) apresentaram resultados um tanto distinto entre os métodos, onde o método COP demonstrou uma vulnerabilidade inferior aos resultados obtidos através do método adaptado (COP – Solo), somando as classes de vulnerabilidades mais baixas dentre os artigos estudados.

A avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos em regiões de clima semiárido envolve considerar vários fatores determinantes que influenciam a suscetibilidade dos aquíferos à contaminação e sua capacidade de recarga, tais como: tipo de solo, clima, geologia, nível do lençol freático até a superfície, tipo de aquífero e também a litologia da zona vadosa. Entretanto alguns desses fatores se mostraram mais preponderantes, sendo utilizados com mais frequência nos estudos avaliados, sendo eles: geologia, solo e profundidade do nível da água ou do aquífero.

Há de se dizer então de forma geral que os artigos estudados no semiárido, apresentam classes de vulnerabilidade distintas entre si, não apresentando uma tendência, mostrando que é um estudo de escala local que deve ser demandada pelos órgãos gestores.

A pesquisa foi feita utilizando estudos dos últimos 20 anos, todavia ressalta-se que há uma concentração maior de trabalhos nos últimos dez anos, isso denota que por mais que os métodos tenham sido criados nas décadas de 80 e 90, ainda são eficazes principalmente nas regiões de clima semiáridos que necessitam proteger esses recursos escassos neste tipo específico de clima. Dessa forma, são metodologias promissoras e atuais para proteção e qualidade da água subterrânea.

5 CONCLUSÃO

De acordo com a presente pesquisa é possível concluir que:

- A metodologia aplicada da presente pesquisa se mostrou útil para o estudo das principais metodologias de vulnerabilidade de aquíferos em regiões de clima semiárido;
- O GOD é a metodologia mais utilizada em aquíferos de clima semiárido devido a funcionalidade de aplicação dos fatores e economicidade;
- A geologia foi preponderante para a escolha do método, onde a maioria dos estudos foram aplicados em aquíferos fraturados e cársticos;
- Conclui-se que são mapeamentos de escala local, para proteção das águas subterrâneas que devem ser utilizadas pelos órgãos gestores com aplicações de trabalhos e pesquisas recentes em regiões de clima semiárido;
- Como trabalhos futuros pretende-se realizar mapeamento de vulnerabilidade de aquíferos na bacia hidrográfica do rio Grotuba no Norte de Minas Gerais aplicando-se o método GOD.

REFÊRENCIAS

- ALLER, L.; BENNET, T.; LEHR, J. H. & PETTY, R. J. 1987. DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. United States Environmental Protection Agency. EPA/600/2-85/018. p.29.
- ALMEIDA, T. *et al.*; Análise preliminar da vulnerabilidade e contaminação de área sob cultivo agrícola com barragem subterrânea no semiárido. **Águas Subterrâneas**, 2006.
- ALVES, M.; RAMOS, I.; CORIDOLA, R. Metodologia DRASTIC na análise da vulnerabilidade dos aquíferos livres de Campos dos Goytacazes. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 14 (SBSR). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2009. p. 3433-3438.
- CHAMBEL, A.; Águas subterrâneas. **Recursos Geológicos de Portugal**. Palimage, 2011. p.523. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10174/7918>
- FEITOSA, F. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações** / organização e coordenação científica *et al.*, 3. ed. rev. e ampl. - Rio de Janeiro : CPRM: LABHID, 2008. p.812. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/14818>
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. Proteção da Qualidade da Água Subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. **Banco Mundial**. Washington, D.C., 2006.
- FRITZSONS, E.; RIZZI, N.; BITTENCOURT, A. V. L.; MANTOVANI, L. E. Estudo do impacto da contaminação por nitrogênio numa bacia hidrográfica cárstica. *Boletim Paranaense de Geociências*, n. 49, p. 39-52, 2001.
- GORAYSKI, John Michael Malveira *et al.* Avaliação de vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas do município de Claro dos Poções-MG. 2021.
- HIRATA, R.; FERNANDES, A.; Vulnerabilidade à poluição de aquíferos. In.: In.: FEITOSA, F. A. C (org.) **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008. p.405.
- MESTRINHO, S.; DA LUZ, J.; DA PORCIÚNCULA, D. Análise da vulnerabilidade intrínseca das águas subterrâneas na bacia do rio Itapicuru, Bahia. **Águas Subterrâneas**, 2006.
- NASCIMENTO, M.; Vulnerabilidade natural à contaminação de aquíferos no município de Campo Formoso–Bahia. 2013.
- NASCIMENTO, Yuri; DE JESUS, J.; GOMES, R.; Vulnerabilidade das águas subterrâneas na região semiárida da Bahia, município de Tucano, pelo método GOD. **Revista Agrogeoambiental**, v. 11, n. 1, 2019.
- NOSSA, T. *et al.* Utilização de análises hidroquímicas e da metodologia COP para determinação da vulnerabilidade do aquífero cárstico salitre na região de Irecê-BA. 2012.

OLIVEIRA, Ana Isabel Leite; FRANCA-ROCHA, W. J. S. A. Modelagem da vulnerabilidade à contaminação de aquíferos livres em região hidrográfica do semiárido baiano explorada pela agroindústria. **XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, p. 6214-6221, 2013.

PAES, E.; Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação das águas subterrâneas no Município de Caetité-BA. 2017.

PEIXOTO, F. Risco de contaminação da água subterrânea em uma sub-bacia urbana. **Mercator (Fortaleza)**, v. 19, p. e19013, 2020.

RIOS, I.; RABELO, J. Estudo do risco de contaminação de aquíferos de sub-bacias baianas. **Águas Subterrâneas**, v. 35, n. 2, 2021.

SANTOS, M.; BASTOS, A.; SANTOS, D.; NOGUEIRA, L.; BARBOSA, B.; LIMA, A. Características de perfuração de poços em aquíferos do norte de minas gerais e cenário atual. **Engenharias do Brasil: inovação e atualidades pós-pandemia**. Recife: Even3 Publicações, 2023. p.55.

SOUZA, R. Vulnerabilidade de aquíferos cársticos com cobertura espessa de solo: metodologia COP-Solo em ambiente tropical úmido. Belo Horizonte, 2020.

FILHO, J. M.; Ocorrência das águas subterrâneas. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008. p.55.

VIAS, J.M.; ANDREO, B.; PERLES, M.; CARRASCO, F.; VADILLO, I.; JIMÉNEZ, P. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. *Hydrogeology Journal*, v. 14, p. 912-925, 2006.

REALIZAÇÃO:



ACESSE NOSSO CATÁLOGO!



WWW.SEVENPUBLI.COM

CONECTANDO O **PESQUISADOR** E A **CIÊNCIA** EM UM SÓ CLIQUE.