

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**FACULDADE DE CIÊNCIAS ECONÔMICAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO**

LUDMILA BEGHINI VIRIATO SANCHEZ

**FRAMEWORK DE DECISÃO ESTRATÉGICA: INTEGRAÇÃO DE TECNOLOGIA  
DIGITAL E SUSTENTABILIDADE NO SETOR DE MINERAÇÃO**

Belo Horizonte

2025

LUDMILA BEGHINI VIRIATO SANCHEZ

**FRAMEWORK DE DECISÃO ESTRATÉGICA: INTEGRAÇÃO DE TECNOLOGIA  
DIGITAL E SUSTENTABILIDADE NO SETOR DE MINERAÇÃO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Centro de Pós-Graduação e Pesquisas em Administração da Faculdade de Ciências Econômicas da Universidade Federal de Minas Gerais para obtenção do título de Mestre em Administração.

Linha de pesquisa: Estratégia, Mercadologia e Operações.

Orientadora: Leydiana de Sousa Pereira

Coorientador: Ricardo Silveira Martins

Belo Horizonte  
2025

Ficha catalográfica

S211f Sanchez, Ludmila Beghini Viriato.  
2025 Framework de decisão estratégica [manuscrito] : integração de tecnologia digital e sustentabilidade no setor de mineração / Ludmila Beghini Viriato Sanchez. – 2025.  
1 v.: il. e tábs.

Orientadora: Leydiana de Sousa Pereira.

Coorientador: Ricardo Silveira Martins.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Centro de Pós-Graduação e Pesquisa em Administração.  
Inclui bibliografia.

1. Planejamento estratégico – Teses. 2. Desenvolvimento sustentável - Brasil – Teses. 3. Tecnologia e administração – Teses. I. Pereira, Leydiana de Sousa. II. Martins, Ricardo Silveira. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Centro de Pós-Graduação e Pesquisa em Administração. IV. Título.

CDD: 658.401

Elaborado por Adriana Kelly Rodrigues CRB-6/2572  
Biblioteca da FACE/UFMG – AKR/015/2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

**ATA**

FACULDADE DE CIÊNCIAS ECONÔMICAS  
CENTRO DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISAS EM ADMINISTRAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO

ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO da Senhora **LUDMILA BEGHINI VIRIATO SANCHEZ**, REGISTRO Nº 788/2025. No dia 28 de janeiro de 2025, às 15:00 horas, reuniu-se de forma híbrida, presencial e remotamente, por videoconferência, a Comissão Examinadora de Dissertação, indicada pelo Colegiado do Centro de Pós-Graduação e Pesquisas em Administração do CEPEAD, em 08 de janeiro de 2025, para julgar o trabalho final intitulado "**FRAMEWORK DE DECISÃO ESTRATÉGICA: INTEGRAÇÃO DE TECNOLOGIA DIGITAL E SUSTENTABILIDADE NO SETOR DE MINERAÇÃO**", requisito para a obtenção do **Grau de Mestre em Administração**, linha de pesquisa: **Estratégia, Mercadologia e Operações**. Abrindo a sessão, a Senhora Presidente da Comissão, Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Leydiana de Sousa Pereira, após dar conhecimento aos presentes o teor das Normas Regulamentares do Trabalho Final, passou a palavra a candidata para apresentação de seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores com a respectiva defesa da candidata. Logo após, a Comissão se reuniu sem a presença da candidata e do público, para julgamento e expedição do seguinte resultado final:

APROVAÇÃO

REPROVAÇÃO

O resultado final foi comunicado publicamente a candidata pela Senhora Presidente da Comissão. Nada mais havendo a tratar, a Senhora Presidente encerrou a reunião e lavrou a presente ATA, que será assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora. Belo Horizonte, 28 de janeiro de 2025.

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Leydiana de Sousa Pereira

ORIENTADORA CEPEAD / UFMG

Prof. Dr. Ricardo Silveira Martins

COORDENADOR CEPEAD / UFMG

Prof. Dr. Jonathan Simões Pereira

CEPEAD / UFMG

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Juliana Maria Magalhães Christino

CEPEAD / UFMG



Documento assinado eletronicamente por **Leydiana de Sousa Pereira, Professora do Magistério Superior**, em 29/01/2025, às 06:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jonathan Simoes Freitas, Professor do Magistério Superior**, em 29/01/2025, às 09:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Juliana Maria Magalhaes Christino, Professora do Magistério Superior**, em 29/01/2025, às 10:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Diogo Ferreira de Lima Silva, Usuário Externo**, em 29/01/2025, às 15:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Silveira Martins, Chefe de departamento**, em 04/02/2025, às 08:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3888128** e o código CRC **55234EB7**.

## AGRADECIMENTO

A jornada até a conclusão deste mestrado foi desafiadora e repleta de aprendizados, e nada disso teria sido possível sem a proteção divina e o apoio de pessoas especiais, às quais expresso minha mais profunda gratidão.

Primeiramente, agradeço à minha família, principalmente ao meu marido Jordan Sanchez, à minha filha Valentina e aos meus pais Maria Ângela e Wellington pelo amor incondicional, compreensão e incentivo constantes, especialmente nos momentos de maior desafio. O apoio familiar foi fundamental para que eu pudesse chegar até aqui.

Agradeço de coração à minha orientadora Leydiana de Sousa Pereira, pelo seu acompanhamento, paciência e incentivo constante. Seu conhecimento e dedicação foram essenciais para a construção deste trabalho e para o meu crescimento acadêmico. Agradeço também ao meu coorientador Ricardo Silveira Martins e os participantes da banca examinadora Juliana Maria Magalhães Christino, Jonathan Simões Freitas e Diogo Ferreira de Lima Silva pelas contribuições positivas que deram ao trabalho.

Ao meu gestor, Eguinaldo de Souza, expresso minha profunda gratidão pelo apoio constante, pela compreensão nos momentos de maior demanda e por incentivar meu desenvolvimento. Seu exemplo de liderança e incentivo foram fundamentais para que eu pudesse conciliar os desafios do mestrado com minha atuação profissional.

Aos participantes desta pesquisa, que gentilmente compartilharam seu tempo e experiências, possibilitando a realização deste estudo. E aos colegas e amigos do Programa de Pós-Graduação em Administração ingressados em 2023 na UFMG, que tornaram essa trajetória mais leve com trocas de conhecimento, apoio mútuo e momentos de descontração.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para esta jornada, seja com palavras de encorajamento, revisões críticas ou simplesmente acreditando no meu potencial.

Muito obrigada!

## RESUMO

A indústria da mineração desempenha um papel fundamental na economia brasileira, conferindo ao Brasil um papel de destaque no cenário global desse setor. Contudo, é uma atividade que acarreta consideráveis impactos ambientais e sociais inerentes às suas operações. Diante desse fato, há uma crescente conscientização para que as mineradoras adotem políticas sustentáveis na gestão e desenvolvimento dos negócios. Considerando a existência de novas tecnologias, mecanismos de transformação digital podem ser elementos impulsionadores para acelerar esse processo de transição ao desenvolvimento sustentável, em linha com a tendência do *twin transition*. Dessa forma, este estudo tem como objetivo construir um ranking de alternativas de transformação digital e sustentabilidade na mineração, visando sua aplicação prática e interconectada em uma empresa mineradora brasileira. Assim, propõe-se um *framework* de tomada de decisão, integrando a técnica de grade de repertório para identificar as soluções digitais que mais impulsionam as iniciativas de sustentabilidade, que foram analisadas diante dos métodos AHP e ELECTRE III para ranquear as alternativas, conforme análise de preferência de um especialista do setor. O resultado é um *framework* robusto que possibilitará à mineradora tomar decisões estratégicas mais informadas e alinhadas com as demandas da sustentabilidade e inovação digital no setor da mineração.

**Palavras-chave:** Transformação digital, Sustentabilidade, Técnica de Grade de Repertório, AHP, ELECTRE III, Mineração.

## ABSTRACT

The mining industry plays a fundamental role in the Brazilian economy, positioning Brazil as a key player in the global mining sector. However, this activity entails significant environmental and social impacts inherent to its operations. Given this reality, there is a growing awareness urging mining companies to adopt sustainable policies in business management and development. Considering the emergence of new technologies, digital transformation mechanisms can serve as key drivers to accelerate this transition process toward sustainable development, aligning with the twin transition trend. Thus, this study aims to develop a ranking of digital transformation and sustainability alternatives in mining, with a focus on their practical and interconnected application in a Brazilian mining company. To achieve this, a decision-making framework is proposed, integrating the repertory grid technique to identify the digital solutions that most drive sustainability initiatives. These alternatives are then analyzed using the AHP and ELECTRE III methods to establish a ranking based on the preference analysis of an industry expert. The outcome is a robust framework that will enable the mining company to make more informed strategic decisions, aligning with the demands of sustainability and digital innovation in the mining sector.

**Keywords:** Digital Transformation, Sustainability, Repertory Grid Technique, AHP, ELECTRE III, Mining industry.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Ranking das 20 maiores mineradoras do Brasil por valor da operação.....	39
Tabela 2: Evolução dos preços de commodities.....	41
Tabela 3: Exemplo de matriz de comparações paritárias .....	48
Tabela 4: Índice Randômico Médio do AHP em função do tamanho da matriz.....	50
Tabela 5: Maiores variações entre as notas dos participantes .....	97
Tabela 6: Pesos obtidos para os 7 critérios analisados .....	101
Tabela 7: Matriz de dominância .....	103
Tabela 8: Ranking das iniciativas pelo ELECTRE III .....	104
Tabela 9: Ranking completo com nomes das iniciativas.....	105

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Escala fundamental AHP.....	48
Quadro 2: Perfis dos participantes da etapa 2.....	63
Quadro 3: Perfis dos participantes da etapa 3.....	64
Quadro 4: Escala Likert de 5 pontos para avaliação .....	65
Quadro 5: Perfis dos participantes da etapa 5.....	66
Quadro 6: Perfil do participante da etapa 6 .....	67
Quadro 7: Lista de iniciativas de sustentabilidade obtidas a partir da RSL .....	70
Quadro 8: Lista de soluções tecnológicas digitais obtidas a partir da RSL.....	79
Quadro 9: Lista de iniciativas de Sustentabilidade validadas pelas especialistas .....	85
Quadro 10: Lista de soluções de Transformação Digital validadas pelos especialistas.....	89
Quadro 11: Soluções digitais combinadas com sustentabilidade priorizadas .....	97
Quadro 12: Construtos obtidos a partir da análise de tríades pelos especialistas.....	100

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Limites planetários.....	21
Figura 2: Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - ODS .....	26
Figura 3: Digitalização relativa por setor industrial .....	30
Figura 4: Componentes da Transformação digital .....	34
Figura 5: Mapeamento mineral brasileiro .....	40
Figura 6: Histórico de faturamento do setor mineral (Bilhões de reais) .....	41
Figura 7: Resultados de exportação e importações do setor mineral .....	42
Figura 8: Detalhamento da pesquisa.....	56
Figura 9: Etapas e abordagens da metodologia .....	59
Figura 10: PRISMA para artigos de Sustentabilidade.....	61
Figura 11: PRISMA para artigos de transformação digital .....	62
Figura 12: Protótipo da grade de repertório gerada.....	64
Figura 13: Exemplo de análise de tríades.....	66
Figura 14: Exemplo de matriz de avaliação dos critérios.....	67
Figura 15: Esquema de avaliação iniciativas e critérios.....	68
Figura 16: Frequência de iniciativas mapeadas nos artigos .....	76
Figura 17: Frequência de soluções digitais mapeadas nos artigos .....	83
Figura 18: Grade de repertório consolidada .....	93
Figura 19: Framework de decisão estratégica .....	110

## LISTA DE SIGLAS

AHP - *Analytic Hierarchy Process*

ANM - Agência Nacional de Mineração

BWM - *Best-Worst Method*

CFEM - Compensação Financeira de Exploração Mineral

COR - Centro de Operações Remotas

DSR - *Design Science Research*

EBITDA - *Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation and Amortization*

ELECTRE - *Elimination et choix traduisant la réalité*

ESG - *Environmental, Social and Governance*

ERP - Sistemas de planejamento de recursos empresariais

FIFO - *Fly-in/Fly-out*

GEE - Gás de Efeito Estufa

GRI - *Global Reporting Initiative*

GCSV - Gestão da Cadeia de Suprimentos Verde

IA - Inteligência Artificial

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração

ICMM - *International Council on Mining and Metals*

IIED - *International Institute for Environment and Development*

IoT - Internet das Coisas

KET - *Key Enabling Technologies*

LILO - *Log-in/Log-out*

MCDA - *Multi-Criteria Decision Analysis*

MCI - *Mining Contribution Index*

MES - Sistemas de Gerenciamento de Produção

ODS - Objetivo de Desenvolvimento Sustentável

ONU - Organização das Nações Unidas

PIB - Produto Interno Bruto

PMB - Panorama Mineração do Brasil

PRISMA - *Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses*

PwC - PricewaterhouseCoopers

RFID - Etiquetas de identificação por radiofrequência

TI - Tecnologia da Informação

UE - União Europeia

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>1.1 Justificativa</b> .....	18
<b>1.2 Estrutura do trabalho</b> .....	20
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	21
<b>2.1 Sustentabilidade</b> .....	21
2.1.1 <i>Sustentabilidade e a mineração</i> .....	23
<b>2.2 Transformação digital</b> .....	29
2.2.1 <i>Transformação digital e a mineração</i> .....	31
<b>2.3 Twin transition</b> .....	36
<b>2.4 Background do setor da mineração</b> .....	38
<b>2.5 Processo decisório: conceitos e métodos</b> .....	42
2.5.1 <i>Técnica de grade de repertório</i> .....	44
2.5.2 <i>AHP</i> .....	47
2.5.3 <i>ELECTRE III</i> .....	50
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	56
<b>3.1 Caracterização da pesquisa</b> .....	56
<b>3.2 Metodologia integrada: Etapas e abordagens combinadas</b> .....	57
<b>3.3 Etapa 1: Revisão Sistemática de Literatura</b> .....	60
3.3.1 <i>Sustentabilidade</i> .....	61
3.3.2 <i>Transformação Digital</i> .....	62
<b>3.4 Etapa 2: Validação com especialistas</b> .....	63
<b>3.5 Etapas 3 e 4: Técnica de Grade de Repertório</b> .....	63
3.5.1 <i>Identificação de iniciativas combinadas entre transformação digital e sustentabilidade</i> ...	64
3.5.2 <i>Identificação de construtos via técnica de Grade de repertório</i> .....	65
<b>3.6 Etapa 5: Método AHP - Pesos dos critérios</b> .....	66
<b>3.7 Etapa 6: ELECTRE III – Ranqueamento</b> .....	67
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	69
<b>4.1 Revisão sistemática de literatura (RSL)</b> .....	69
4.1.1 <i>Sustentabilidade</i> .....	69
4.1.2 <i>Transformação digital</i> .....	78
<b>4.2 Lista de iniciativas e soluções validadas</b> .....	85
4.2.1 <i>Lista de iniciativas de Sustentabilidade validada por especialistas</i> .....	85
4.2.2 <i>Lista de soluções tecnológicas de transformação digital validada</i> .....	88
<b>4.3 Grade de repertório</b> .....	92
<b>4.4 Construtos definidos via Técnica de Grade de Repertório</b> .....	99

<b>4.5 Pesos dos critérios definidos por meio da calculadora AHP .....</b>	<b>100</b>
<b>4.6 Iniciativas ranqueadas a partir do método ELECTRE III .....</b>	<b>101</b>
4.6.1 <i>Matriz de dominância</i> .....	102
4.6.2 <i>Ranking</i> .....	104
4.6.3 <i>Análise qualitativa do ranqueamento obtido</i> .....	105
<b>4.7 <i>Framework</i> de decisão estratégica: Integração de tecnologias digitais e sustentabilidade - <i>twin transition</i> .....</b>	<b>110</b>
<b>4.8 Resumo dos resultados obtidos .....</b>	<b>111</b>
<b>5.CONCLUSÕES E LIMITAÇÕES.....</b>	<b>115</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>118</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A sustentabilidade tem sido um tema central nas discussões sobre desenvolvimento global, especialmente diante das ameaças ambientais impulsionadas pela era do Antropoceno (Crutzen; Brauch, 2016). Desde a Revolução Industrial, as ações antrópicas aceleradas impuseram desafios sem precedentes. Problemas como poluição, perda de biodiversidade e esgotamento de recursos naturais afetam diretamente a qualidade de vida e comprometem o bem-estar das futuras gerações (WWF, 2014). Nesse contexto, conceitos como os limites planetários, ESG (Environmental, Social and Governance) e ODS (Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis) surgem como ferramentas fundamentais para guiar políticas e práticas sustentáveis. A ciência da sustentabilidade, portanto, busca equilibrar as necessidades humanas com a preservação dos ecossistemas, promovendo estratégias que garantam a continuidade das atividades produtivas sem comprometer a resiliência do planeta (Turner *et al.*, 2003).

No setor de mineração, a sustentabilidade assume um papel crucial devido à natureza intrinsecamente extrativista dessa atividade. A mineração é essencial para a economia global, fornecendo matérias-primas indispensáveis para diversas indústrias. No entanto, os impactos socioambientais decorrentes das operações minerárias são significativos, incluindo desmatamento, contaminação da água e do solo, deslocamento de comunidades e grandes volumes de resíduos (Azapagic, 2004; Worrall *et al.*, 2009). A busca por um modelo sustentável para a mineração envolve a adoção de práticas que mitiguem esses impactos, como a reabilitação de áreas degradadas, o uso eficiente dos recursos e a implementação de tecnologias para redução da emissão de gases de efeito estufa.

Ainda que de maneira muito incipiente, a atividade da mineração tem adotado práticas mais sustentáveis, com vistas a reduzir os impactos das suas atividades no meio ambiente e nas comunidades anfitriãs (Monteiro *et al.*, 2019; Mancini; Sala, 2018). Entretanto, um estudo realizado no Brasil identificou que as mineradoras continuam reativas e no limiar das exigências legais em termos da sustentabilidade, e a expansão desordenada das áreas de mineração impõem externalidades sociais e ambientais, além de reduzir a vida útil das jazidas minerais (Angotii *et al.*, 2024). Neste contexto, destaca-se a importância de intensificar as ações para minimizar os impactos ambientais, promovendo uma abordagem mais equilibrada e responsável para as atividades da mineração (Angotii *et al.*, 2024; Blinova *et al.*, 2022).

Essa tradição nas atividades da mineração também é refletida com relação a introdução da inovação em seus processos e estruturas. Vial (2021) e Morakanyane *et al.* (2017) explicitam a transformação digital como um processo evolutivo que aproveita as capacidades digitais e tecnológicas para impulsionar que modelos de negócios, processos operacionais e experiências do cliente criem maior valor às partes interessadas. Mesmo com essa projeção de melhorias de desempenho, diante do uso intensivo e direcionado da tecnologia, esta é uma realidade ainda distante ao setor da mineração. Em termos corroborativos, considera-se o estudo do *McKinsey Global Institute* (MGI) que examinou o estado da digitalização em diferentes setores da economia dos Estados Unidos, um país reconhecido pela sua supremacia econômica e tecnológica, e constatou que há consideráveis oportunidades de melhoria no setor da mineração (Gandhi *et al.*, 2016).

Segundo Nwaila *et al.* (2022), algumas realidades atuais dentro da indústria de mineração potencializam a necessidade de uma abordagem inovadora e transformadora. São elas: (i) Uma dependência crescente de jazidas anteriormente subeconômicas; (ii) Um risco aumentado associado à mineração e ao processamento de minérios de baixa qualidade e preços flutuantes de commodities; (iii) Falta de tecnologia para separar minério de baixa e alta qualidade em escala de produção em massa; (iv) O aumento da profundidade e as localizações cada vez mais remotas de potenciais jazidas; (v) Uma adoção lenta de conceitos de digitalização e dados, e seu uso associado a análise, ciência de dados e inteligência artificial para aumentar ou automatizar a tomada de decisões; e (vi) Uma infraestrutura de mina madura ou desatualizada em alguns empreendimentos de mineração existentes e até mesmo novos devido ao investimento mínimo.

Nesta perspectiva surge a preocupação transformada na pergunta de pesquisa deste estudo: como é possível identificar e priorizar soluções tecnológicas digitais e iniciativas de sustentabilidade que, vistas de forma integrada, contribuam para uma mineração mais sustentável? Para responder a esta pergunta, abordagens do processo decisório podem proporcionar direcionamentos mais assertivos à organização. Processos formais de tomada de decisão estão sendo cada vez mais requisitados ao considerar o volume e diversidade de necessidades dos *stakeholders* que precisam ser compiladas em um ato decisório (de Sousa Pereira; Morais, 2020). Para responder ao gap evidenciado, a presente pesquisa integra abordagens de revisão sistemática de literatura (RSL) para mapear as principais tecnologias digitais e ações de sustentabilidade sendo implementadas na mineração; uma análise da relação entre elas utilizando a técnica de grade de repertório para medir o quanto cada solução

impulsiona as iniciativas de sustentabilidade, selecionando as de maior relevância; definição de construtos pela técnica de grade de repertório e pesos por meio do método AHP (*Analytic Hierarchy Process*); e finalmente, uma análise de ranqueamento mediante ao método ELECTRE III (*Elimination and Choice Translating Reality*). Ou seja, propõe-se um afinilamento ao uso dos métodos multicritério de apoio a decisão (MCDA).

Em suma, o presente estudo tem como objetivo geral propor um framework para apoiar a tomada de decisão quanto a soluções tecnológicas digitais, que impulsionam a sustentabilidade no setor da mineração. Para tal fim, foram estipulados os seguintes objetivos específicos:

1. Mapear alternativas orientadas à mineração digital e sustentável com resultados validados por especialistas do setor;
2. Identificar soluções tecnológicas digitais que impulsionam as iniciativas de sustentabilidade;
3. Identificar construtos de apoio na tomada de decisão;
4. Definir pesos para os construtos;
5. Construir um ranking das alternativas.

Como é possível observar, a pesquisa tem um enquadramento metodológico do *Design Science Research* (DSR), o qual se constitui em um processo rigoroso de projetar artefatos para resolver problemas, avaliar o que foi projetado ou o que está funcionando, e comunicar os resultados obtidos (Çağdaş; Stubkjær, 2011). Amplamente aplicada nas áreas de engenharia, administração e tecnologia da informação, a DSR se diferencia de métodos tradicionais por focar na criação de soluções práticas e cientificamente fundamentadas (Rodrigues, 2018). Por consequência, o conhecimento desenvolvido pela *Design Science Research* não é descritivo-explicativo, ele é prescritivo (Lacerda, 2013).

Para tornar-se possível a proposição do framework, o presente estudo almeja desenvolver uma aplicação prática em uma empresa brasileira do setor de mineração, cuja principal atividade é a extração e o beneficiamento de minério de ferro, um recurso essencial para a indústria siderúrgica mundial. Seus produtos são amplamente exportados, garantindo uma posição relevante no mercado internacional. A organização se destaca pela escala de suas operações industriais e pela aplicação de tecnologias avançadas na produção de pelotas de minério de ferro. No entanto, além de sua relevância econômica, a empresa enfrenta desafios significativos relacionados a questões ambientais e sociais decorrentes de suas atividades,

estando no centro de debates sobre sustentabilidade, gestão de riscos e responsabilidade corporativa no setor de mineração.

### 1.1 Justificativa

A mineração, embora tenha a capacidade de gerar riqueza e emprego, inúmeros são seus impactos ambientais e sociais. O desafio para os governos, a indústria de mineração e a população em geral é como equilibrar as questões socioeconômicas e ambientais de uma forma que maximize os benefícios e minimize ou elimine os danos e a degradação (Worrall *et al.*, 2009), garantido assim sua sustentabilidade. Diante dos desafios cada vez mais urgentes, a necessidade de promover práticas sustentáveis na mineração tornou-se uma prioridade tanto para as empresas do setor quanto para os órgãos reguladores, a sociedade em geral e a academia científica.

Nesse contexto, a transformação digital apresenta-se como uma oportunidade para impulsionar a sustentabilidade na mineração. A adoção de tecnologias digitais, como automação, Internet das Coisas (IoT) e análise de dados em tempo real, pode não apenas melhorar a eficiência operacional e a segurança, mas também reduzir o impacto ambiental e promover o desenvolvimento sustentável (Zaman *et al.*, 2024). No entanto, apesar do potencial da transformação digital para promover a sustentabilidade na mineração, há uma lacuna no entendimento de como essas duas agendas estão interconectadas e como as empresas podem efetivamente integrar a transformação digital em suas estratégias de sustentabilidade (Barnewold; Lottermoser, 2020).

Numa tentativa de promover um futuro sustentável, a Comissão Europeia definiu o objetivo de utilizar tecnologias digitais para perseguir um futuro verde através de transformações sistemáticas, introduzindo o conceito de transições gêmeas ou transições duplas, do inglês *Twin transition* (Declaration, 2021), que se refere a uma transição verde e digital interligada e simultânea para compensar a pegada de carbono das empresas. Portanto, as empresas operam sob a suposição de que as tecnologias digitais podem ajudar nos seus esforços de sustentabilidade (El Hilali *et al.*, 2020). A *Twin Transition* está ganhando relevância crescente no setor de manufatura, pois se esforça para implementar e explorar tecnologias digitais para melhorar a sustentabilidade ambiental das empresas (Perossa *et al.*, 2023), entretanto no setor da mineração esse conceito ainda é pouco explorado (Kumar *et al.*, 2023). Em bases de dados como *Scopus e Web of Science*, não chegam a 5 artigos que trazem este

conceito na indústria de mineração, ao mesmo tempo que não passam de 50 os artigos relacionados a transformação digital no setor.

Ainda que sem mencionar o termo *twin transition*, Issatayeva *et al.* (2023) pontuaram que a digitalização dos processos empresariais acelera a transição do Cazaquistão para uma economia sustentável e de baixo carbono. Storey (2023) afirma que a automação, a disponibilidade de dados e as telecomunicações melhoradas permitem que um número crescente de operações de mineração seja realizado remotamente, reduzindo o impacto da constante presença de “estranhos” nas comunidades onde as mineradoras estão localizadas. Ambos reforçam a relação existente entre as alternativas de transformação digital e as práticas de sustentabilidade aplicadas à mineração, a qual este estudo pretende investigar e contribuir cientificamente.

Uma inovação proposta neste estudo é a utilização da técnica de grade de repertório somada aos métodos multicritério de apoio a decisão para o objetivo de ranquear alternativas de transformação digital e sustentabilidade no setor da mineração. Esta integração metodológica é inovadora, principalmente no setor sob consideração. Sendo assim, o resultado deste estudo contribui para a linha de pesquisa de operações e principalmente para as pesquisas relacionadas a digitalização e sustentabilidade em um setor altamente demandado por iniciativas sustentáveis.

É importante salientar as principais implicações práticas obtidas nesta pesquisa. Para a mineração, a partir dos resultados obtidos no objeto de pesquisa, as soluções tecnológicas digitais mais relevantes, consideradas habilitadoras para diversas iniciativas de sustentabilidade compreendem o uso de sensores, dados em tempo real e automação. As iniciativas de sustentabilidade mais impulsionadas por tecnologias digitais são: Aumento da eficiência operacional e melhoria da atratividade do mineral no mercado; otimização do consumo de energia e redução de consumo de recursos energéticos não renováveis; e melhoria das condições de trabalho (ambiente seguro, bem-estar, salário digno, etc.). Visto de forma combinada, dados em tempo real para redução de riscos físicos tais como inundações, incêndios e movimentação de terras na mina e nas comunidades anfitriãs; e sensores e dados em tempo real para redução da contaminação de água, solo e ar foram as iniciativas mais bem posicionadas no ranqueamento realizado, isto é, as mais bem avaliadas quanto aos critérios empregados na pesquisa.

A obtenção deste ranqueamento só foi possível devido ao sucesso na construção do *framework*, que explicita o passo a passo para que qualquer mineradora ou até mesmo

organizações de outros setores possam tomar decisões estratégicas considerando: alternativas de relevância científica e prática, combinações de alternativas de forte relação entre elas, critérios apropriados com pesos estabelecidos e, finalmente, o ranqueamento para seguir com as implementações. Pode-se concluir que a concatenação dos métodos escolhidos tornou possível a identificação e priorização de soluções tecnológicas digitais e iniciativas de sustentabilidade que, vistas de forma integrada e alinhada ao *twin transition*, contribuem para uma mineração mais sustentável, respondendo à pergunta da pesquisa.

## **1.2 Estrutura do trabalho**

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos, incluindo a presente introdução, que aborda as motivações e justificativas para o estudo, detalhando os objetivos, as abordagens metodológicas adotadas e o objeto de pesquisa selecionado.

O Capítulo 2 traz a fundamentação teórica, explicando conceitos de sustentabilidade, transformação digital e o panorama do setor da mineração. O Capítulo 3 apresenta os conceitos e métodos escolhidos para compor o processo decisório as etapas da metodologia definida para a construção do framework de decisão estratégica composta pela Revisão Sistemática de Literatura, a técnica de grade de repertório, AHP e ELECTRE III.

No Capítulo 4, são discutidos os resultados obtidos, tais como as soluções tecnológicas digitais e as iniciativas de sustentabilidade mais relevantes nos artigos acadêmicos, e a visão de especialistas da empresa objeto de pesquisa em relação a tais soluções e iniciativas. Além disso, é possível identificar as iniciativas mais impulsionadas pelas soluções tecnológicas, os critérios de avaliação mais relevantes para os especialistas nestes conceitos, com seus respectivos pesos, e finalmente o ranking de iniciativas e soluções combinadas. Por fim, o Capítulo 5 conclui o estudo, sintetizando as principais contribuições, destacando as vantagens do framework e sugerindo direções para pesquisas futuras.

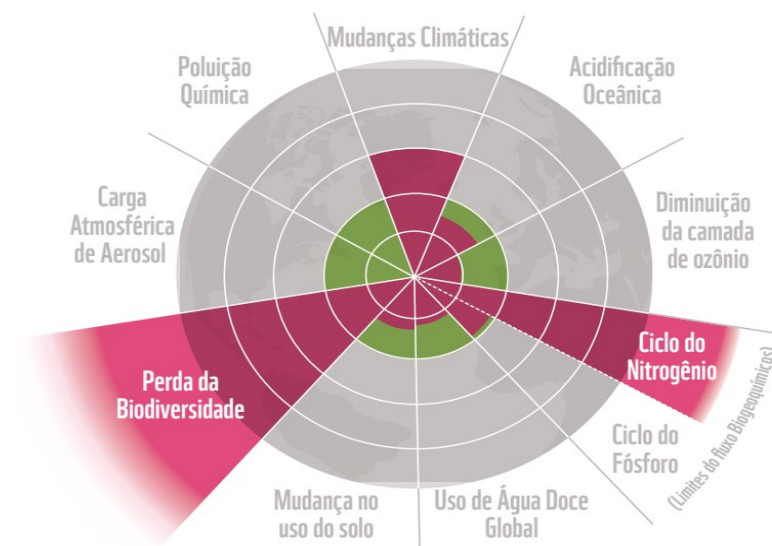
## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Sustentabilidade

Embora o planeta Terra tenha passado por muitos períodos de alterações ambientais significativas, o seu ambiente tem sido estável nos últimos 10.000 anos. Neste período, conhecido pelos geólogos como Holoceno, as mudanças ambientais ocorreram naturalmente e a capacidade reguladora da Terra manteve condições que permitiram o desenvolvimento humano (Rockström *et al.*, 2009). Entretanto, esta estabilidade pode estar ameaçada. Desde a Revolução Industrial, surgiu a era Antropoceno, em que as ações humanas se tornaram o principal motor das alterações ambientais globais (Crutzen; Brauch, 2016).

Problemas ambientais, como a perda de biodiversidade, a poluição da água, do ar e do solo, o esgotamento dos recursos e o uso excessivo da terra estão promovendo perigos aos sistemas de suporte à vida na Terra (WWF, 2014). O conceito de limites planetários, extraído do Relatório Planeta Vivo (2014), identifica os processos ambientais que regulam a estabilidade do planeta. Esses limites estabelecem um “espaço seguro de operação” para a humanidade, onde há chances de continuar se desenvolvendo e prosperando por gerações. Ao ultrapassar estes limites, entra-se numa zona de perigo estando susceptível a mudanças abruptas e negativas. Inclusive, alguns limites já foram ultrapassados, como mostra a Figura 1. As mudanças climáticas afetam a biodiversidade e a biocapacidade do planeta, junto com o bem-estar da humanidade, particularmente quanto à segurança alimentar e hídrica.

Figura 1: Limites planetários



Fonte: Adaptado de WWF Relatório Planeta Vivo (2014).

Segundo Rockström *et al.* (2009), ultrapassar um limite pode ameaçar seriamente a capacidade de permanecer dentro de níveis seguros para outros limites. Isso significa que nenhum limite pode ser ultrapassado por longos períodos sem comprometer o espaço operacional seguro para a humanidade. Portanto, a humanidade precisa se tornar um guardião ativo de todos os limites planetários para evitar o risco de uma desastrosa interrupção social e ambiental de longo prazo. Neste contexto, a emergência da “ciência da sustentabilidade” conduz a uma compreensão da condição homem-ambiente com o duplo objetivo de satisfazer as necessidades da sociedade e, ao mesmo tempo, sustentar os sistemas de suporte à vida do planeta (Turner *et al.*, 2003). O desenvolvimento sustentável é um conceito que tenta moldar a interação entre meio ambiente e sociedade, para que os avanços no bem-estar não sejam acompanhados pela deterioração dos sistemas ecológicos e sociais que sustentam a vida no futuro (Jia *et al.*, 2015).

No contexto de sustentabilidade, outro conceito que tem ganhado destaque no cenário corporativo global, refletindo uma mudança paradigmática, é o ESG (*Environmental, Social, and Governance*). Por definição, segundo Elkington (1998), ESG representa um conjunto de critérios que mede o desempenho ambiental, social e de governança das empresas, influenciando diretamente as decisões de investimento e estratégias de negócio. Sua origem pode ser rastreada desde a década de 1970, quando os investidores começaram a considerar questões sociais e ambientais em suas avaliações de investimentos. Elkington (1998) explica que a evolução do ESG está intimamente ligada ao desenvolvimento da Responsabilidade Social Empresarial (RSE) e ao conceito de sustentabilidade. Na década de 1990, o conceito de *Triple Bottom Line* (TBL), também elaborado por Elkington (1998), introduziu a ideia de que as empresas devem ser avaliadas não apenas pelo desempenho econômico, mas também pelo impacto ambiental e social. Esse tripé da sustentabilidade serviu como precursor do ESG, destacando a necessidade de um equilíbrio entre lucro, pessoas e planeta.

Belinky (2022) aprofunda a discussão sobre a evolução histórica e teórica do ESG, destacando como esse conceito se tornou uma ferramenta fundamental para avaliar a sustentabilidade e a responsabilidade corporativa. O pesquisador argumenta que o ESG não é apenas uma extensão da Responsabilidade Social das Empresas (SER), mas uma abordagem mais estruturada e mensurável que permite uma avaliação mais precisa do desempenho das corporações em áreas críticas. Além disso, o estudo explora como o ESG foi integrado nas políticas de investimento de grandes instituições financeiras, reforçando sua importância no cenário global.

Ao discorrerem sobre o primeiro pilar do ESG, o ambiental, Dang *et al.* (2018) explicam que o conceito remete às práticas empresariais que minimizam os impactos ambientais negativos. Isso inclui a gestão de recursos naturais, redução de emissões de carbono, eficiência energética e gestão de resíduos. Hinojosa-López *et al.* (2020) destacam que as empresas que adotam práticas ambientais responsáveis não apenas contribuem para a sustentabilidade do planeta, mas também melhoram sua reputação e atraem investidores preocupados com o meio ambiente.

Na publicação da consultoria ACE Cortex (2021), ao tratarem do segundo pilar, o social, ensinam que ele está relacionado às práticas que afetam diretamente as partes interessadas internas e externas, incluindo políticas de trabalho, direitos humanos, diversidade e inclusão, e envolvimento comunitário. No mesmo sentido, Gomes (2017) define esta dimensão como forma de assegurar que as empresas operem de maneira ética e justa, promovendo o bem-estar dos funcionários, clientes e comunidades onde operam. A inclusão de políticas sociais robustas pode melhorar a moral dos funcionários e fortalecer a lealdade do cliente.

A governança corporativa, o terceiro pilar do ESG, refere-se às estruturas e processos que favoreçam a direção e controle eficazes das empresas. Isso inclui a composição do conselho de administração, políticas de remuneração, transparência e ética empresarial (Andrade; Rossetti, 2006). A boa governança é essencial para a sustentabilidade de longo prazo das organizações, pois garante a conformidade com as leis e regulamentos, reduz o risco de fraudes e promove a confiança dos investidores (IBGC, 2015). De Vasconcelos *et al.* (2023) argumentam que a governança eficaz é um diferencial competitivo, pois proporciona uma base sólida para a tomada de decisões estratégicas e a gestão de riscos. Os três pilares do ESG são interdependentes e mutuamente reforçadores. As práticas ambientais e sociais eficazes dependem de uma governança robusta para serem implementadas e mantidas. Borsatto *et al.* (2023), são enfáticos em afirmar que a governança eficaz é fortalecida por práticas ambientais e sociais que aumentam a reputação e a resiliência da empresa. A integração desses três aspectos em uma estratégia de negócios coesa é fundamental para o sucesso a longo prazo.

### 2.1.1 Sustentabilidade e a mineração

Embora a mineração tenha a capacidade de gerar riqueza e emprego, inúmeros são seus impactos ambientais e sociais. O desafio para os governos, a indústria de mineração e a população em geral é como equilibrar as questões socioeconômicas e ambientais de uma forma que maximize os benefícios e minimize ou elimine os danos e a degradação (Worrall *et al.*,

2009), garantido assim sua sustentabilidade. Segundo Azapagic (2004), o setor deve ser capaz de medir e avaliar o seu desempenho de sustentabilidade e demonstrar melhorias contínuas a longo prazo a fim de garantir a continuação da sua licença social para operar. A mineração é base da economia de diversos países e essencial para a vida cotidiana, entretanto as operações extrativistas conduzem invariavelmente a uma gama de impactos ambientais, incluindo o esgotamento de recursos não renováveis, a perturbação da paisagem e ameaças acima da média para a saúde e segurança dos trabalhadores e dos cidadãos (Azapagic, 2004).

Problemas como estes deram origem à Iniciativa Global de Mineração e ao estudo "Mineração, Minerais e Desenvolvimento Sustentável" – MMDS (GMI, 2024). A IGM teve sua origem em uma reunião de vários CEOs do setor da mineração em Londres em 1998 (Villas-Bôas, 2011). Em 2002, foi publicado no IIED – *International Institute for Environment and Development*, as principais conclusões do projeto MMSD, que abordam quatro pilares do desenvolvimento sustentável (IIED, 2002), sendo:

Pilar 1 - Desenvolvimento econômico:

- Maximizar o bem-estar humano;
- Garantir o uso eficiente de todos os recursos, naturais e outros, maximizando os renováveis;
- Buscar identificar e internalizar os custos ambientais e sociais;
- Manter e aprimorar as condições para empreendimentos viáveis.

Pilar 2 - Desenvolvimento social:

- Garantir uma distribuição justa dos custos e benefícios do desenvolvimento para todos os envolvidos nas atividades;
- Respeitar e reforçar os direitos fundamentais dos seres humanos, incluindo liberdades civis e políticas, autonomia cultural, liberdades sociais e econômicas e segurança pessoal;
- Buscar sustentar melhorias ao longo do tempo; garantir que a redução dos recursos naturais não prive as futuras gerações através da substituição por outras formas de capital.

Pilar 3 - Desenvolvimento ambiental:

- Promover a gestão responsável dos recursos naturais e do meio ambiente, incluindo a compensação de danos passados;
- Minimizar o desperdício e o dano ambiental ao longo de toda a cadeia de suprimentos;
- Exercer prudência onde os impactos são desconhecidos ou incertos;
- Operar dentro dos limites ecológicos e proteger o capital natural crítico.

#### Pilar 4 - Desenvolvimento de governança:

- Apoiar a democracia representativa, incluindo a tomada de decisões participativa;
- Incentivar a livre iniciativa dentro de um sistema de regras claras e justas e incentivos;
- Evitar a concentração excessiva de poder por meio de verificações e equilíbrios adequados;
- Garantir transparência fornecendo a todas as partes interessadas acesso a informações relevantes e precisas;
- Garantir responsabilidade pelas decisões e ações, que são baseadas em análises abrangentes e confiáveis;
- Incentivar a cooperação para construir confiança e objetivos e valores compartilhados;
- Garantir que as decisões sejam tomadas no nível apropriado, aderindo ao princípio da subsidiariedade sempre que possível.

Além disso, a publicação do IIED (2002) corrobora que um dos maiores desafios que o mundo enfrenta hoje é integrar a atividade econômica com integridade ambiental, preocupações sociais e sistemas de governança eficazes. O objetivo dessa integração pode ser visto como “desenvolvimento sustentável”. No contexto da mineração, o objetivo deve ser maximizar a contribuição para o bem-estar da geração atual de forma a garantir uma distribuição equitativa de seus custos e benefícios, sem reduzir o potencial para as gerações futuras atenderem às suas próprias necessidades. A abordagem adotada para alcançar isso deve ser abrangente – incluindo toda a cadeia mineral – e voltada para o futuro, estabelecendo objetivos de longo e curto prazo (IIED, 2002).

A mineração e os diferentes setores pela qual se relacionam direta ou indiretamente, devem de forma integrada estarem empenhados quanto à proposta de desenvolvimento sustentável. Os ODS (ver Figura 2) consistem, de forma resumida, em um apelo global à ação para acabar com a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima e garantir que as pessoas, em todos os lugares, possam desfrutar de paz e de prosperidade. Os 17 objetivos, também

conhecidos como ODS foram estabelecidos pela ONU em 2015 e compõem uma agenda proposta globalmente em vista à construção e implementação de políticas públicas que visem guiar a humanidade até 2030 (ONU-Brasil, 2024), de modo a garantir um planeta sustentável para as futuras gerações.

Figura 2: Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - ODS



Fonte: Site da ONU-Brasil (2024).

Monteiro *et al.* (2019), a partir de uma revisão de literatura e visitas de campo em mineradoras, verificaram que existem diversas possibilidades de alcançar os 17 ODS no setor de mineração, como na promoção de empregos (ODS 8), contribuindo para a redução da pobreza (ODS 1) e da fome (ODS 2), entre outros. Monteiro *et al.* (2019) também constataram que há um pequeno número de mulheres nas equipes, configurando um desrespeito ao ODS 5 em relação à conquista da igualdade de gênero. A natureza da atividade em si não justifica a assimetria que possivelmente aconteceu sob a influência de uma cultura machista que impõe o que é trabalho de homem ou de mulher. Outro ponto é a falta de investimento em educação inclusiva para funcionários e moradores da região. Além disso, essas indústrias não recuperam as áreas degradadas, comprometendo o alcance do ODS 13, no que diz respeito ao combate às mudanças climáticas e seus impactos.

Além dos ODS, o *Global Reporting Initiative* (conhecido como GRI) é uma organização internacional independente existente há mais de 25 anos, responsável por arquitetar a linguagem global comum para avaliar e relatar impactos ambientais, sociais e econômicos. Além disso, o GRI fornece padrões, ferramentas e treinamento para que empresas, governos e outras organizações entendam e comuniquem seus impactos em questões como mudanças climáticas,

direitos humanos e corrupção. O GRI estabelece padrões globais para relatórios de impacto, segue um processo independente e multissetorial, mantém os padrões de relatórios de sustentabilidade mais abrangentes do mundo e seus padrões estão disponíveis como um bem público gratuito ([globalreporting.org](http://globalreporting.org), 2024). Por estas razões o GRI é um importante meio de comunicação e informação para entender, comparar e investigar práticas relacionadas a sustentabilidade.

Segundo Mancini e Sala (2018), após comparar e avaliar conjuntos de indicadores de diferentes fontes tais como os utilizados nos ODS e no GRI, identificaram que os impactos relacionados ao uso da terra e impactos ambientais que afetam a saúde humana e os direitos humanos parecem ser os aspectos sociais mais preocupantes no setor de mineração. Benefícios de renda e emprego são, em vez disso, os principais impactos positivos identificados na literatura examinada.

Outro aspecto importante estudado por Adiansyah *et al.* (2015) é a necessidade de uma melhor gestão de rejeitos pela mineração, uma vez que a produção futura de minérios de menor teor em minas aumente, gerando uma tonelagem maior de rejeitos. Segundo Obenaus-Emler *et al.* (2020), ano após ano, a indústria de mineração gera de 5 a 7 bilhões de toneladas métricas de rejeitos no mundo todo. A necessidade de uma estrutura abrangente para o gerenciamento de rejeitos, que promova o desenvolvimento sustentável está, portanto, se tornando cada vez mais reconhecida pela indústria de mineração. Owen *et al.* (2020) destacam a importância de estabelecer e compartilhar conhecimento diverso sobre o risco de desastres em barragens de rejeitos em virtudes das últimas ocorrências envolvendo barragens em Minas Gerais, Brasil. Fontes *et al.* (2016), visando mitigar o impacto ambiental da indústria de mineração de ferro, avaliaram a viabilidade técnica do uso de rejeitos de minério de ferro como material de construção, para argamassas de assentamento e revestimento.

Um tema que também vem sendo bastante estudado é a gestão da cadeia de suprimentos duradoura, verde e sustentável da mineração (Bag *et al.*, 2020; Luthra *et al.*, 2015; Muduli *et al.*, 2020). Adotar práticas ambientais como o *Green Supply Chain Management* (GSCM) corresponde a adotar práticas de gestão ambiental essenciais em todos os setores de uma indústria para atender aos requisitos de regulamentações ambientais e às demandas dos clientes. Globalmente, países desenvolvidos e em desenvolvimento estão revisando suas políticas ambientais existentes para optar por maneiras de sustentar o meio ambiente (Mathiyazhagan *et al.*, 2015).

Neste contexto de sustentabilidade da mineração, a Licença Social para Operar - LSO, uma expressão que se refere ao nível de aceitação que uma empresa ou projeto tem pelas comunidades anfitriãs, se torna fundamental (Jijelava; Vanclay; 2017). O conceito de licença social para operar é apropriado e atraente para a maioria das organizações. Não ter uma LSO pode ter consequências significativas para os projetos. A falta de aceitação social provavelmente levará a uma série de ações de protesto que podem resultar em danos físicos à propriedade da empresa; atrasos no projeto e perda de produção; ação judicial contra a empresa; ação regulatória contra a empresa, incluindo condições adicionais impostas, multas, pedidos de indenização concedidos contra a empresa ou a revogação de licenças legais para operar; perda de reputação; reação do mercado de ações; custos extras, entre outras. Por estas razões tem-se a importância de gerar um impacto positivo nas vidas das pessoas que vivem em comunidades de mineração locais (Andrews, 2016).

A emissão de CO<sub>2</sub> tem atraído cada vez mais atenção em todo o mundo e inclusive do setor da mineração. Atualmente, as crescentes preocupações com as emissões de Gases com Efeito de Estufa (GEE), principalmente as emissões de CO<sub>2</sub>, refletem questões ambientais, como o aumento da temperatura global e a condutância de transferência de calor de áreas urbanas (WEI *et al.*, 2017). Um fator que aumenta tais emissões são instalações inadequadas de transporte e logística das indústrias de mineração. As emissões tóxicas de veículos de transporte regular contribuem para o aquecimento global, que pode ter efeitos devastadores no meio ambiente (GUPTA *et al.* 2021).

Além da redução da emissão de GEE, a redução de consumo de água também é um desafio para a mineração. O Chile, por exemplo, contém algumas das áreas mais secas do mundo, mas as atividades humanas nessas áreas requerem grandes volumes de água, o que resulta em regiões com escassez ainda maior, levando à degradação ambiental, conflitos e redução da produtividade industrial. A mina de Escondida, no Chile, tem um plano altamente ambicioso para fornecer toda a água necessária por meio da dessalinização da água do mar, liberando assim a planta de todas as necessidades de água doce (Aitken *et al.* 2016).

Além dos pontos ressaltados, outros desafios à mineração são uso exaustivo das terras, desmatamentos, produção de resíduos, contaminação da água, solo e ar, deslocamento e reassentamento da comunidade e conflitos de uso da terra (Jiskani *et al.*, 2021). A economia circular é uma prática que pode mitigar certos impactos, principalmente quanto a reciclagem e utilização de recursos. Em um mundo de recursos naturais reduzidos e muitas vezes escassos, a reciclagem e a utilização de recursos aumentam as oportunidades de crescimento econômico,

isso é especialmente importante dada a crescente demanda por recursos naturais nas economias emergentes, exacerbada pela transição de baixo carbono (Upadhyay *et al.*, 2021).

A indústria de mineração se beneficiaria da transformação digital, por meio da adoção de tecnologias, abordagens e soluções modernas para enfrentar seus desafios crônicos e recentes. Os desafios crônicos incluem a associação da indústria com a degradação ambiental e o desenvolvimento de "baixa tecnologia". Os desafios recentes incluem o impulso em direção a uma maior consciência social, sustentabilidade e circularidade material (Nwaila *et al.*, 2022).

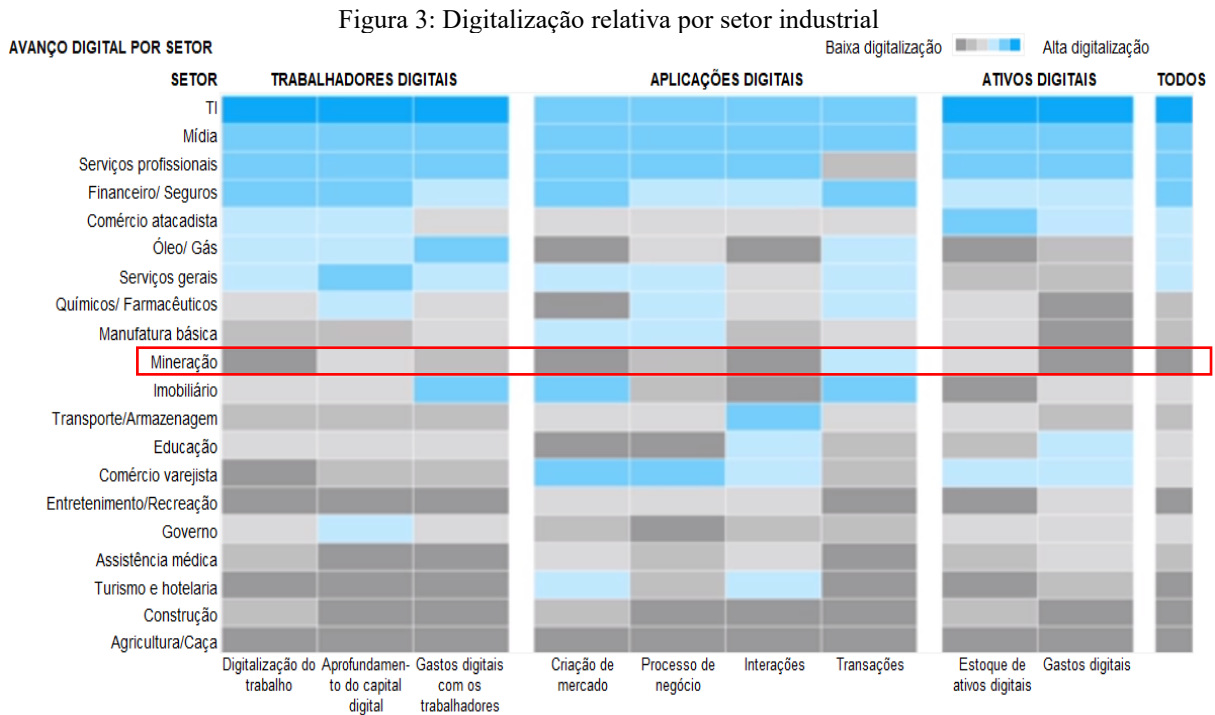
## 2.2 Transformação digital

A transformação digital representa um processo que visa melhorar uma entidade, desencadeando mudanças significativas em suas propriedades por meio de combinações de tecnologias de informação, computação, comunicação e conectividade (VIAL, 2019). Demirkan *et al.* (2016) apontam a transformação digital como uma mudança profunda e acelerada de atividades de negócios, processos, competências e modelos para aproveitar ao máximo as oportunidades trazidas pela tecnologia digital e seu impacto na sociedade de uma forma estratégica e priorizada. Ainda é possível afirmar que transformação digital é a seleção cuidadosa e aplicação eficaz de tecnologias digitais para capacitar pessoas, otimizar processos e automatizar sistemas da organização para alcançar uma mudança radical no desempenho dos negócios (Yokogawa, 2021).

No âmbito corporativo, por exemplo, a transformação digital está presente pela utilização de *big data*, de análises de dados em tempo real, computação na nuvem, plataformas de mídia social e inteligência artificial. Essa transformação está trazendo mudanças significativas nas operações, nos processos empresariais e na geração de valor (Nwankpa; Roumani, 2016), permitindo benefícios como aumento nas vendas e na produtividade, novas formas de interação com clientes, entre outros (Matt *et al.*, 2015). A digitalização se tornou uma necessidade empresarial crucial, aproveitando as últimas tecnologias para aprimorar os processos operacionais, garantir competitividade estratégica, mitigar riscos e melhorar o desempenho empresarial (Lazarenko *et al.*, 2021). Entretanto, vale a pena ressaltar que a transformação digital só agrega valor se for resiliente, se abordar algo que os sistemas existentes não oferecem e melhorar o resultado de custo, produtividade, meio ambiente, pessoal ou segurança (Cahill, 2021).

Um estudo da *Harvard Business Review*, baseado em uma pesquisa do *McKinsey Global Institute* (MGI), examinou o nível da digitalização em diferentes setores da economia dos

Estados Unidos, revelando disparidades entre setores e até mesmo entre empresas do mesmo setor. A análise centrou-se em 27 indicadores agrupados em três categorias, trabalhadores digitais, aplicações digitais e ativos digitais (ver Figura 3) (Gandhi *et al.*, 2016).



A categoria “ativos digitais” mensura o quanto as empresas investem em *hardware*, *software*, dados e serviços de TI. Esta categoria também considera o quanto as empresas estão digitalizando seus ativos físicos — ou seja, se possuem edifícios inteligentes, frotas de veículos conectados e sistemas de *big data* ou IoT, que maximizam o desempenho de equipamentos, sistemas e cadeias de fornecimento. Por sua vez, a categoria “aplicações digitais” mede o quanto as empresas interagem digitalmente com clientes e fornecedores. Empresas nos setores líderes fazem um uso mais extensivo de pagamentos digitais, marketing digital e desenvolvimento de produtos orientado pelo design. E a categoria “trabalhadores digitais” mensura o grau em que as empresas disponibilizam ferramentas digitais nas mãos de seus funcionários para aumentar a produtividade (Gandhi *et al.*, 2016).

De acordo com o resultado desse estudo, o setor de tecnologia lidera o ranking como o mais avançado digitalmente. Logo atrás estão os setores de mídia, financeiro e serviços profissionais, todos possuindo capacidades digitais muito mais sofisticadas do que o restante dos setores. Gandhi *et al.* (2016) concluíram que os ativos digitais em toda a economia dobraram nos últimos 15 anos, à medida que as empresas investiram não apenas em TI, mas na

digitalização de seus ativos físicos. O uso digital na forma de transações, interações com clientes e fornecedores e processos internos de negócios cresceu quase cinco vezes e, ao longo de todo o período, os setores líderes mantiveram uma enorme vantagem em uso em relação a todos os outros. No entanto, o maior diferencial vem de ter uma força de trabalho digitalmente capacitada. Nas últimas duas décadas, o desempenho dos setores líderes em várias métricas de trabalho digital aumentou oito vezes, enquanto o restante da economia avançou minimamente.

### 2.2.1 Transformação digital e a mineração

Especificamente, o setor da mineração ocupa a décima posição deste ranking nos Estados Unidos (Figura 3). Diante deste resultado, conclui-se que as mineradoras estão num cenário em que precisam rever seus processos e planos em vistas a proporcionar maior adesão à transformação digital.

A digitalização na indústria da mineração é considerada como um processo de adoção de tecnologias, dispositivos digitais, métodos, sistemas, dados digitalizados e análises avançadas. A implementação destes recursos visa a redução de custos, melhoria do desempenho operacional e transformação geral das práticas de mineração no sentido de torná-las mais seguras, mais eficientes e sustentáveis (Lazarenko *et al.*, 2021). Segundo o relatório da *Ernest & Young Global* (2021), ao examinar os 10 principais riscos e oportunidades da mineração, o item otimização digital e de dados passou do terceiro maior risco para a nona posição entre os anos de 2020 e 2021, demonstrando melhorias no processo de digitalização. Para 2025, cibernética e digital saíram da lista. Para muitas empresas, os riscos e oportunidades apresentados pela cibernética e digital agora são integrais aos negócios como rotina, não garantindo atenção especial, o que os levou a sair da lista dos top 10 (Mitchell, 2024).

Acredita-se que muitas empresas deste setor estão no quarto ou quinto ano da jornada digital e, à medida que essa transformação se torna presente, o risco para a organização reduz. O impacto da COVID-19 destacou os benefícios de diversas tecnologias, como automação, Inteligência Artificial e *blockchain*, para ajudar a garantir a continuidade dos negócios. As empresas que investiram no avanço da jornada digital estão agora colhendo os benefícios e continuarão a ter uma vantagem competitiva para além da pandemia (Shearer; Mitchell, 2021).

As mineradoras em todo o mundo estão almejando melhor condicionamento nesta jornada digital. Issatayeva *et al.* (2023) apresentam a importância da digitalização para as empresas de mineração do Cazaquistão, cujo setor extrativista possui alta relevância para o país. Issatayeva *et al.* (2023) abordam assuntos relacionados à competitividade, à descarbonização,

à tomada rápida de ação para se adaptar a mudanças político-econômicas e à necessidade de diversificação. Assim, a digitalização dos processos empresariais acelera a transição do Cazaquistão para uma economia sustentável e de baixo carbono, num contexto de intensa concorrência global e dos crescentes riscos geopolíticos.

Zhironkin e Taran (2023) pontuam que, no mundo, o setor da mineração na próxima década poderá sofrer um choque de investimentos e uma desestabilização do mercado global de matérias-primas. Como uma contramedida de longo prazo contra os choques tecnológicos no segmento extrativista, Zhironkin e Taran (2023) veem o desenvolvimento da Mineração de Superfície 4.0 como uma plataforma para a modernização acelerada de todo o setor ao nível da Indústria 4.0. As principais áreas de domínio da Mineração de Superfície 4.0 observadas incluem o seguinte: Internet das Coisas, gêmeos digitais, Big Data, computação em nuvem, sensores inteligentes, visualização 3D, blockchain, redes neurais e inteligência artificial, visão e aprendizado de máquina e mineração não tripulada, veículos autônomos e drones.

Além disso, Storey (2023) aponta que a mina do futuro, provavelmente, envolverá menos *fly-in/fly-out* (FIFO) para o local da mina e mais *log-in/log-out* (LILO) em centros de operações remotas. A automação, a disponibilidade de dados e as telecomunicações melhoradas permitem, pela primeira vez, que um número crescente de operações de mineração seja realizado remotamente. Neste estudo, os principais exemplos apresentados ocorrem em mineradoras do Canadá e Austrália, devido à maior disponibilidade de informações sobre as atividades de digitalização nesses países, destacando a mina de minério de ferro Gudai-Darri (Pilbara, Austrália), por seus avanços tecnológicos (Storey, 2023).

A transformação digital também vem sendo implementada nas mineradoras do Peru (Merma, 2023). Nesse estudo, conclui-se que o conceito de Mineração 4.0 não tem sido trabalhado nas abordagens estratégicas da mineração peruana, com exceção das multinacionais. Existem evidências de aplicações de *Key Enabling Technologies* (KET) na mineração peruana, principalmente *Cloud Computing, Analytics e Cybersecurity*. Também foi evidenciado que a inovação digital está presente tanto na mineração multinacional (Anglo American) quanto na nacional (Minsur), considerando, assim, um conceito amadurecido (Merma, 2023).

Em Zimbábue, Kilpin *et al.* (2023) investigam como a transformação digital pode apoiar a gestão de títulos de terras mineiras, também chamado de Direito Minerário, para criar transparência e responsabilização às partes interessadas, incluindo a população e os parceiros do país. A partir de uma infinidade de opções disponíveis, Kilpin *et al.* (2023) propõem uma solução tecnológica baseada na Identidade Autossoberana (do inglês SSI - *Self Sovereign*

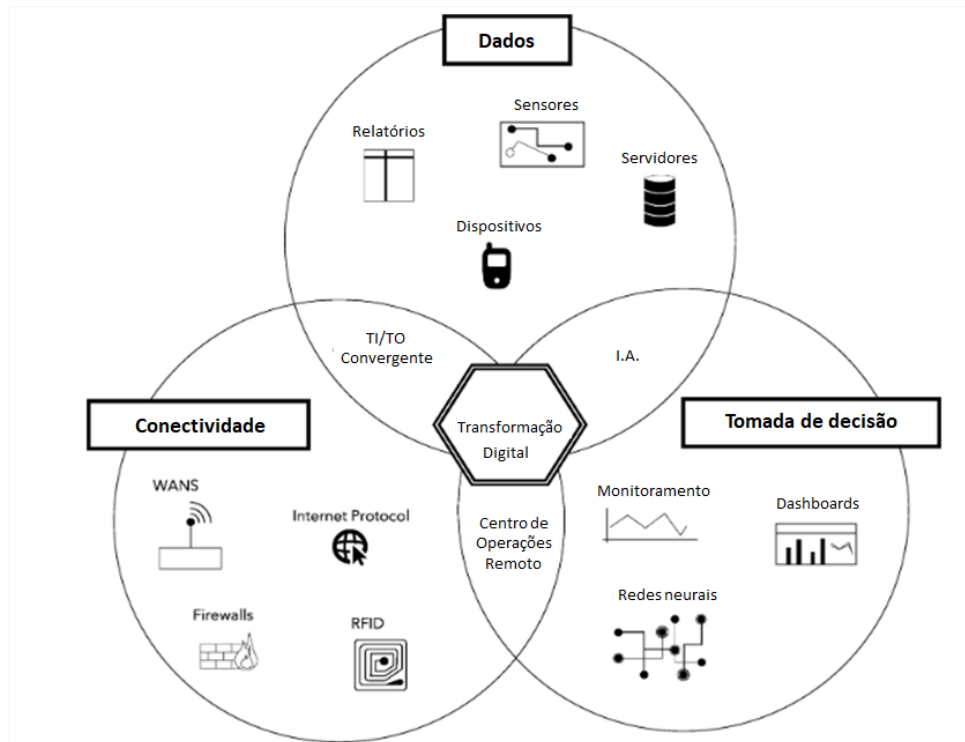
*Identity*) do Blockchain para resolver a falta de transparência e responsabilidade na gestão de títulos de terras de mineração. No país, os interesses nacionais e corporativos estão no cerne da negociação de um valor justo ao buscar lucro, ao mesmo tempo em que se tenta equilibrar a igualdade e a sustentabilidade do setor.

O Vietnam é um dos poucos países do mundo que possui uma estratégia e um plano para a transformação digital (Van Hau *et al.*, 2022). Isto pois, desde junho de 2020, com a aprovação do “Programa Nacional de Transformação Digital até 2025, com orientação até 2030”, o governo do Vietnã confirmou que esse é um processo inevitável para o país, visando acelerar a modernização do sistema de distribuição, melhorar a competitividade das empresas e promover o desenvolvimento dos mercados doméstico e de exportação. Para o país, a transformação digital no setor de mineração de carvão e minerais é a integração e aplicação de plataformas avançadas de tecnologia digital em todos os campos da mineração, como gestão, planejamento, exploração, transporte, processamento e enriquecimento mineral, cooperação, busca de investimento, vendas, atendimento ao cliente, entre outros. Esta digitalização em todas as etapas da cadeia de produção e de suporte tem o objetivo de otimizar operações, reduzir custos, aumentar lucros, distribuir a cadeia de valor, elevar a competitividade, garantir a segurança no trabalho e contribuir para a proteção ambiental e exploração sustentável dos recursos minerais (Van Hau *et al.*, 2022).

Ademais, Van Hau *et al.* (2022) pontuam evolução da transformação digital no campo da mineração de carvão e minerais no Vietnã. Graças à plataforma tecnológica da Indústria 4.0, as empresas de mineração de carvão vietnamitas transitaram de uma mineração tradicional para um modelo de mineração inteligente, o que resultou no aumento da produtividade, eficiência laboral e segurança. Ao mesmo tempo, a transformação digital tem auxiliado no processo de mineração a reduzir os impactos negativos no meio ambiente e propiciar o desenvolvimento sustentável. Entretanto, em comparação com outros setores, o nível de transformação digital no campo da mineração de carvão e minerais ainda é lento. Conseqüentemente, tem-se que os avanços obtidos indicam que a transformação digital nessas empresas certamente terá um desenvolvimento adicional no futuro.

Com base nestas discussões evidenciadas e considerando a proposta de Young e Rogers (2019), pode-se estabelecer que os principais componentes do processo de transformação digital na mineração pautam-se em dados onipresentes, conectividade e tomada de decisão. Uma ilustração integrada e detalhada desses componentes e seus elementos estruturantes está representada na Figura 4.

Figura 4: Componentes da Transformação digital



Fonte: Adaptado de Young e Rogers (2019)

Exemplo de integração e aplicação de dados, conectividade e tomada de decisão pode ser evidenciado em sistemas de ventilação de minas subterrâneas, que se beneficiou com a transformação digital em função do uso de sensores, análise de dados e automação. Software de inteligência digital está sendo usado para a regulação da temperatura por meio da integração adequada com os sistemas de ventilação eletromecânicos existentes, com isso se alcança a preservação da qualidade do ar e regulação de gases e poeira perigosos, salvaguardando a saúde e a segurança dos funcionários (Singh *et al.*, 2018).

A integração e automatização dos sistemas de transporte na mineração, impulsionados pela segurança, velocidade e economia também evidencia a transformação de atividades realizadas isoladas em campo para operações controladas remotamente graças ao progresso da tecnologia de informações e comunicação (Onifade *et al.* 2023). Ulewicz *et al.* (2022) apresentam seis principais pontos da mineração do futuro, sendo:

1. Controle remoto da maioria das atividades de mineração;
2. Redução do risco associado à interface humano-máquina por meio do uso de soluções modernas no campo da robótica e dispositivos autônomos;

3. Aplicações de realidade virtual e aumentada;
4. Monitoramento e análise da produção da mina em tempo real, utilizando escaneamento e monitoramento, e tomada de decisões em tempo real com base nos dados recebidos;
5. Planejamento e otimização do projeto da mina em tempo real (conceito de gêmeo digital);
6. Holografia do design da mina.

Barnewold e Lottermoser (2020) identificaram as principais tecnologias digitais relevantes ao setor e seu estágio de implementação e uso. Os resultados demonstram que “automação”, “robótica”, “internet das coisas”, “*big data*”, “dados em tempo real”, “aprendizado de máquina”, “inteligência artificial” e “impressão 3D” são as tecnologias-chave para o setor da mineração. Barnewold e Lottermoser (2020) definiram “*big data*” como uma grande quantidade de dados que não pode ser tratada pelo processamento convencional de dados e pelas competências humanas. O termo “dados em tempo real” refere-se à velocidade, capacidade de resposta e oportunidade de entrega de dados ao usuário. Desta maneira, a indústria mineira pode significativamente ser beneficiada pela implementação de análises de “*big data*” e de “dados em tempo real”.

Um exemplo de aplicação de *big data* e análise preditiva na mineração foi apresentado por Bag *et al.* (2022) sobre o desenvolvimento de capacidades dinâmicas, ou seja, visibilidade da cadeia de abastecimento. Neste estudo, Bag *et al.* (2022) apontaram a importância de desenvolver a resiliência da rede de suprimentos nas indústrias mineiras sul-africanas e destacaram que a resiliência dos recursos e a da comunidade são vitais para a sustentabilidade da indústria mineira, em resposta às mudanças nas condições climáticas, principalmente na África do Sul, país estudado. As organizações necessitam de um sistema de monitoramento, dados emergentes em tempo real e análise preditiva para otimizar o planejamento e a execução estratégica (Araz *et al.*, 2020).

Outro componente da transformação digital são os Centro de Operações Remotas – COR, que correspondem a modelos operacionais que visam à unificação e integração de processos de forma sistêmica, privilegiando a otimização global em detrimento à visão de áreas ou silos. Segundo Young e Roger (2019), CORs vêm se tornando indispensáveis para gerenciar, sintetizar e agir sobre os grandes volumes de dados recebidos pelas empresas de mineração. Os CORs utilizam tecnologias implementadas comumente por outros setores, como computação

em nuvem e visualização de dados, para fornecer uma maneira útil e significativa de tomar decisões rápidas e impactantes, entretanto esta realidade ainda está distante da mineração.

Landgren e Sood (2006) destacam a crescente necessidade das empresas do setor de petróleo e gás por ambientes que permitam a operação em tempo real, integrando informações de campo, aplicativos e gestores das operações em uma única plataforma. Essa integração possibilita a visualização dos parâmetros operacionais diários e a tomada de decisões ágeis. A maioria das empresas desse setor acredita que a tomada de decisões em tempo real, aliada aos recursos e infraestrutura globais, contribui para melhorar a produtividade em campo e reduzir custos. Para implementar com sucesso esses centros de operações, é fundamental ter definições claras dos processos de negócio e uma infraestrutura tecnológica robusta para suportá-los.

### **2.3 Twin transition**

Segundo o Fórum Econômico Mundial (2022), a abordagem do *twin transition* reconhece que há uma oportunidade enorme e amplamente inexplorada para tecnologia e dados impulsionarem metas de sustentabilidade. Em vez de tratar o digital e a sustentabilidade isoladamente, uma estratégia de transição dupla combina essas funções críticas para desbloquear enormes benefícios em termos de eficiência e produtividade. A transição dupla pode causar um impacto positivo ao "esverdear" a tecnologia, os ativos de dados e as infraestruturas, ao mesmo tempo em que acelera a sustentabilidade em toda a organização.

O conceito de transição dupla, abrangendo mudanças verdes e digitais, foi apresentado pela União Europeia - UE como a pedra angular das transformações que definirão o futuro da mesma. Essa transição dupla, impulsionada por uma abordagem de cima para baixo e ocupando um lugar de destaque na agenda política, significa a transformação necessária para atingir objetivos verdes e digitais. A sinergia decorrente da fusão de ambas as transições vai muito além de seus impactos individuais. A digitalização pode amplificar a transição verde e é indispensável para compreender, avaliar e comparar alternativas, desafiando assim a abordagem predominante de *business-as-usual* e traçando novos caminhos em direção a um futuro mais sustentável, circular e digital, abrangendo as três dimensões principais do desenvolvimento sustentável: social, econômica e ambiental (Askar *et al.*, 2024).

No relatório Rumo a um futuro verde e digital (2022) os principais requisitos para a dupla transição são agrupados em cinco grupos temáticos (Muench *et al.*, 2022):

1. Social, para garantir uma transição justa, aumentar o engajamento social na mudança e garantir a privacidade e o uso ético da tecnologia.
2. Tecnológico, implementando infraestrutura de inovação, construindo um ecossistema de tecnologia e garantindo disponibilidade e segurança de dados.
3. Ambiental, evitando efeitos rebote e reduzindo o impacto das tecnologias verdes-digitais;
4. Econômico, para criar mercados facilitadores, garantir a diversidade de participantes do mercado e equipar a mão de obra com habilidades relevantes.
5. Política, implementando padrões adequados, garantindo a coerência das políticas e canalizando investimentos para soluções verdes e digitais.

Conforme base de dados da Scopus, consultada em janeiro de 2025, os estudos científicos relacionados ao *twin transition* começaram a ser publicados pelos acadêmicos a partir de 2018, sendo a Itália o país que mais publica sobre o assunto. A transição dupla ou gêmea vem sendo estudada no setor energético (García Casañas; Kovacic, 2025), na indústria de manufatura (Stratmann *et al.*, 2023), indústria da moda (Zoppelletto *et al.*, 2025; Re *et al.*, 2024), na agricultura (Lanfranchi *et al.*, 2023; Dal Mas *et al.*, 2024), entre outros.

No setor da mineração, poucos são os estudos relacionados a *twin transition*, sendo esta pesquisa uma oportunidade de intensificar a integração da sustentabilidade e a digitalização no setor. Kumar *et al.* (2023) estudaram tendências como digitalização sustentável e transição dupla, para superar as barreiras associadas à obtenção de reciclagem circular eficiente. No estudo, é mostrado que metodologias interdisciplinares, a integração de diversas tecnologias (digital/verde) e a incorporação de técnicas de reciclagem de última geração abrem o potencial futuro no setor de reciclagem. As práticas atuais de reciclagem de sucatas à base de carboneto de tungstênio foram aceitas como economicamente e parcialmente benéficas ao meio ambiente e podem promover a reciclagem de circuito fechado de tungstênio; no entanto, baixas taxas de reciclagem funcional e perdas significativas de metal em estágios variados dificultam a recuperação econômica dos metais (Kumar *et al.*, 2023). Por estas razões, torna-se importante e necessária a investigação integrada da digitalização e sustentabilidade melhorando processos de reciclagem.

Como efeito desta transição, Herbert e Hidalgo (2021) estudaram a transformação no que diz respeito à força de trabalho na indústria mineral em função da transição dupla. Segundo Herbert e Hidalgo (2021), a indústria de mineração criará novos produtos, serviços, mercados

e modelos de negócios, bem como novos tipos de empregos que ainda não existem, mas que exigirão habilidades que os estudantes ainda não possuem. A amplitude e profundidade, a escala e a velocidade, a natureza e a necessidade das duas transições são sem precedentes. Por isso, a indústria europeia não pode simplesmente se adaptar; ela deve se tornar a aceleradora e viabilizadora da mudança e inovação.

Em resumo, a abordagem *twin transition* surgiu da crescente necessidade de integrar transformação digital e sustentabilidade como estratégias complementares para impulsionar a inovação e a competitividade das empresas. Seu desenvolvimento está diretamente ligado a iniciativas da União Europeia, que, por meio de políticas como o *European Green Deal* e a *Digital Strategy*, promove a transição simultânea para uma economia mais sustentável e digitalizada (Askar *et al.*, 2024). O conceito ganhou força com a percepção de que a digitalização pode ser um grande facilitador da sustentabilidade, otimizando processos produtivos, reduzindo desperdícios, melhorando a eficiência energética e facilitando a adoção de modelos de economia circular (Askar *et al.*, 2024). Assim, a *twin transition* tem sido amplamente discutida em setores industriais, ainda que com importantes oportunidades de desenvolvimento no setor da mineração.

#### **2.4 Background do setor da mineração**

A mineração corresponde a uma atividade econômica e industrial abrangente, que envolve pesquisa, exploração e beneficiamento dos minérios presentes no subsolo. Essa atividade desempenha um papel fundamental na configuração da sociedade, visto a gama de produtos e recursos derivados da mineração, como, energia, moradia, saneamento, transporte, meios de comunicação, computadores, celulares, microscópios eletrônicos, satélites artificiais, agricultura e outros (ANM; PMB, 2023). As principais empresas deste mercado incluem Grupo BHP, Vale S.A., Rio Tinto, *Glencore International*, *Anglo American plc*, *China Shenhua Energy Company Limited*, *China Coal Energy Company Limited*, *The Metallurgical Corp of China*, *Coal India Ltd* e *Corporación Nacional del Cobre de Chile* (The Business Research Company, 2023). Os principais países de mineração incluem Austrália, Chile, China, Rússia, Canadá, Brasil, República Democrática do Congo (RDC), África do Sul e Estados Unidos (Leighton, 2024).

Segundo o relatório *21st Mine* da PwC (Rossouw; Millán, 2024), o desempenho financeiro das 40 maiores empresas de mineração do mundo vem sendo pressionado pela queda

dos preços das commodities e pelo aumento dos custos. Este desempenho resultou em 2023 uma receita de US\$ 845 bilhões, um EBITDA de US\$ 217 bilhões e um lucro líquido de US\$ 90 bilhões, resultados inferiores quando comparados com 2022, entretanto significativos quando comparados com outros setores globais.

A transição energética somada a outras fortes tendências estruturais continua a sustentar uma poderosa demanda mundial de longo prazo por commodities de minérios. O fornecimento de minerais como lítio, cobalto e elementos de terras raras é vital para a produção de baterias, turbinas eólicas e painéis solares, que são componentes-chave de uma economia que usa energia renovável e de baixo carbono (Escamilla, 2024). A urbanização e as necessidades contínuas de desenvolvimento de infraestrutura na Índia e em outras partes da Ásia e do mundo em desenvolvimento continuarão a absorver a produção de mineradoras de minério de ferro, cobre e outras commodities (Rossouw; Millán, 2024).

Além da transição energética e da infraestrutura, a mineração desempenha um papel crítico na segurança alimentar global e na redução do impacto da produção agrícola no meio ambiente, devido à sua ligação direta no fornecimento de matérias-primas necessárias para uma ampla gama de insumos e consumíveis exigidos na agricultura. Os fertilizantes comerciais são produzidos a partir de três ingredientes principais: nitrogênio, fósforo e potássio. Enquanto o nitrogênio é geralmente obtido da cadeia de valor do petróleo e gás, o potássio e o fósforo são extraídos de rocha fosfática e salmoura. Esses fertilizantes sintéticos têm sido essenciais para o esforço bem-sucedido de décadas para melhorar o crescimento, o rendimento e a qualidade das colheitas (Rossouw; Millán, 2024). No Brasil, as 20 maiores empresas mineradoras estão listadas na Tabela 1 por valor de operação, segundo a Agência Nacional de Mineração - ANM (ANM, 2023). Cabe apontar que há casos em que empresas são subsidiárias de outras e não estão agrupadas por grupo econômico.

Tabela 1: Ranking das 20 maiores mineradoras do Brasil por valor da operação

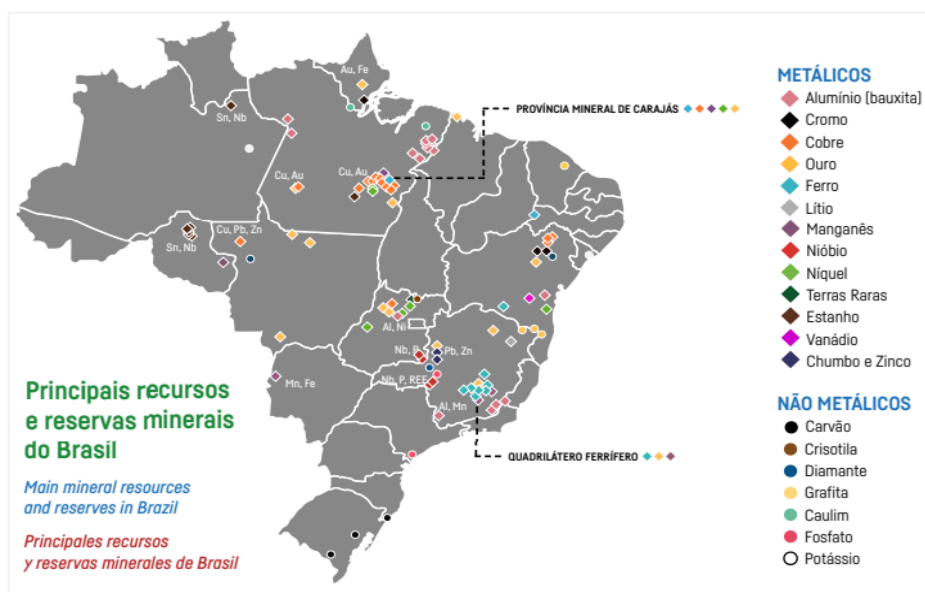
#	TOP 20 empresas	Valor da operação (R\$)
1	Vale S.A.	103.450.686.479,22
2	Minerações Brasileiras Reunidas S.A.	11.848.300.293,48
3	Anglo American Minério de Ferro Brasil S/A	11.195.638.200,99
4	Csn Mineracao S.A.	7.903.973.736,68
5	Salobo Metais S.A.	7.085.283.494,80
6	Kinross Brasil Mineração S.A.	4.925.273.009,04
7	Anglogold Ashanti Corrego Do Sitio Mineração S.A.	3.053.811.875,69
8	Mineração Usiminas S.A.	2.901.997.064,31
9	Fenix Distribuidora de Titulos e Valores Mobiliarios	2.557.250.918,13
10	Mineração Maracá Indústria e Comercio S.A.	2.462.508.329,83

11	Mineração Rio Do Norte S.A.	2.275.772.784,63
12	Mineração Paragominas S.A.	2.170.994.390,13
13	Mineração Caraíba S.A.	2.169.359.278,06
14	Arcelormittal Brasil S.A.	2.074.574.625,83
15	Companhia Baiana de Pesquisa Mineral Cbpm	1.993.725.190,66
16	Mosaic Fertilizantes P&K Ltda.	1.953.572.506,86
17	Jacobina Mineração E Comercio Ltda	1.764.624.748,19
18	Samarco Mineração S A	1.571.916.281,00
19	Mineração Corumbaense Reunida S.A.	1.517.893.310,90
20	AMG Brasil S.A.	1.345.665.734,23

Fonte: PNM (2023)

O Brasil destaca-se na produção mineral, sendo que 85% do faturamento de 2023 do setor foram derivados do minério de ferro (56,9% - R\$ 141,2 bilhões); minério de ouro (8,5% - R\$ 21,1 bilhões); minério de cobre (6,5% - R\$ 16,1 bilhões); calcário dolomítico (3,8% - R\$ 9,4 bilhões); granito (2,6% - R\$ 6,5 bilhões); água mineral (2,5% - R\$ 6,2 bilhões); e bauxita (2,3% - R\$ 5,7 bilhões) (IBRAM, 2024). As principais reservas minerais do Brasil podem ser observadas na Figura 5. O minério de ferro posiciona o país como o segundo maior produtor mundial, cuja supremacia é da Austrália. As reservas nacionais de nióbio representam 90% das fontes no planeta, posicionando o Brasil no 1º lugar na produção mundial, além da terceira posição mundial em produção de bauxita. Dentre os bens minerais não metálicos, a grafita e o caulim também são abundantes em território brasileiro, sendo que a primeira responde por cerca de 50% das reservas mundiais (PMB, 2023).

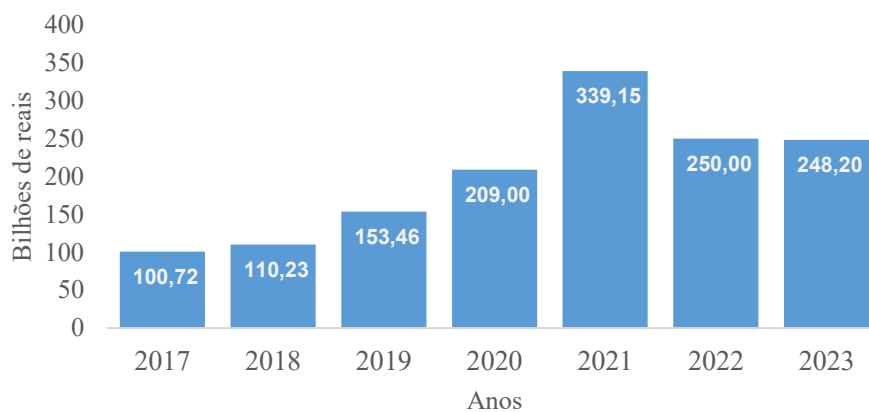
Figura 5: Mapeamento mineral brasileiro



Fonte: PMB (2023).

Ainda que os resultados de 2023 sejam representativos para o histórico da mineração, o setor mineral registrou queda de 0,7% no faturamento em relação a 2022 e queda de 26% quando comparado 2022 e 2021, conforme a Figura 6. Segundo o IBRAM (2023), o controle de estoques de minério de ferro nos portos chineses e a redução da produção siderúrgica repercutiu na redução da demanda por minério de ferro pela China, influenciando a queda de preço entre 2021 e 2022.

Figura 6: Histórico de faturamento do setor mineral (Bilhões de reais)



Fonte: PMB (2023).

A Tabela 2 aponta a evolução dos preços das *commodities*. O impacto da queda de atividade chinesa na mineração brasileira é significativo, em razão do posicionamento da China entre os clientes-chaves brasileiros no exterior.

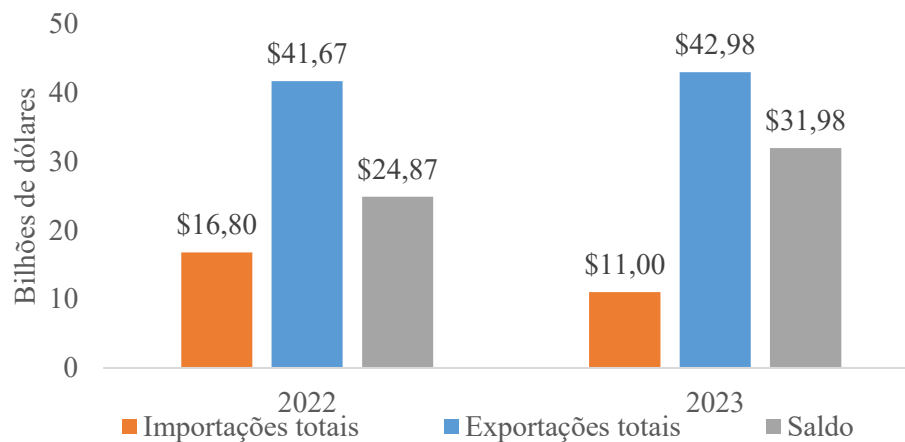
Tabela 2: Evolução dos preços de commodities

PREÇOS MÉDIOS ANUAIS						
Commodities	Unidade	2020	2021	2022	2023	2023 x 2022
Alumínio	US\$/t	1.702,02	2.475,25	2.706,55	2.225,18	-17,8%
Chumbo	US\$/t	1.824,04	2.195,97	2.152,63	2.130,12	-1,0%
Cobre	US\$/t	6.167,15	9.365,76	8.813,98	8.466,12	-3,9%
Estanho	US\$/t	17.132,65	33.051,66	31.360,44	26.032,21	-17,0%
Níquel	US\$/t	13.723,43	18.545,31	25.627,23	21.609,30	-15,7%
Zinco	US\$/t	2.263,65	2.996,75	3.484,42	2.636,58	-24,3%
Minério de ferro	US\$/t	108,45	159,93	120,23	120,11	-0,1%
Outros	US\$/ozt	1.770,25	1.799,75	1.800,90	1.954,22	8,5%

Fonte: Platts, LME, CME Group, Index Mundi, World bank (PMB, 2023) e IBRAM (2024)

As exportações minerais brasileiras alcançaram US\$ 42,98 bilhões, um aumento de 3,1%. O saldo comercial mineral, de US\$ 31,98 bilhões, equivale a 32% do saldo comercial brasileiro, que foi de US\$ 98,84 bilhões (Figura 7).

Figura 7: Resultados de exportação e importações do setor mineral



Fonte: IBRAM (2024)

O setor, apesar dos importantes números e sua relevância para a sociedade, tem inúmeros desafios, principalmente aqueles relacionados a seus impactos ambientais e sociais, tais como direitos humanos, reassentamento, diversidade de gênero, fechamento de mina, poluição, rejeitos e resíduos. Ao adotar práticas ecologicamente corretas, a mineração desempenhará também um papel fundamental no avanço da sustentabilidade e no combate às mudanças climáticas (Escamilla, 2024).

## 2.5 Processo decisório: conceitos e métodos

Compreender e implementar combinadamente os princípios e práticas da transformação digital e da sustentabilidade no contexto da mineração é essencial considerando os desafios e oportunidades desse setor. A integração de tecnologias digitais com práticas sustentáveis, além de permitir maior eficiência operacional, redução de custos e melhorias na gestão de riscos, também assegura a conformidade ambiental, social e econômica, indispensáveis para a reputação corporativa e a longevidade do setor. Neste âmbito, o processo decisório desempenha um papel crucial nesta jornada. A complexidade do setor da mineração exige decisões estratégicas que integrem seus projetos e práticas não apenas considerando o ambiente e capacidades internas, mas possibilite uma visão holística considerando por exemplo elementos da responsabilidade ambiental e social. Assim, escolher tecnologias em sinergia com práticas como descarbonização, gestão de resíduos e engajamento comunitário permite maximizar benefícios.

Um processo decisório bem estruturado não apenas orienta investimentos, mas também permite que essas ações contribuam equilibradamente para as habilidades e necessidades do negócio, fortalecendo a competitividade e a reputação do setor. Segundo Saaty (1990), talvez a etapa mais criativa para tomar uma decisão é escolher os fatores que são importantes para essa decisão. A capacidade de tomar decisões informadas e integradas é, portanto, essencial para transformar desafios em oportunidades e promover um futuro mais sustentável para a mineração.

Os métodos multicritério correspondem às abordagens que auxiliam na organização e síntese das informações em um processo de decisão visando uma solução satisfatória, que por sua vez, é dificultada pela presença de critérios conflitantes (Zeleny, 1986).

Um problema de decisão multicritério representa uma situação em que se tem pelo menos duas ações para se optar e deve focar a satisfação de múltiplos objetivos (De Almeida, 2013). Representativamente, corresponde a um conjunto A de alternativas e uma família F de critérios, na qual o decisor pode, segundo Vincke (1992):

- Estabelecer um subconjunto de F com as melhores alternativas de todo o espaço de ações possíveis (Problemática de escolha - P. $\alpha$ );
- Segmentar o conjunto A obedecendo determinadas normas (Problemática de classificação - P. $\beta$ ); ou,
- Ordenar de forma decrescente, ou seja, da melhor para a pior, as alternativas de A (Problemática de ordenação - P. $\gamma$ ).

Vincke (1992) classifica os métodos multicritério de apoio a decisão (do inglês *Multi-Criteria Decision Aid*, MCDA) em três conjuntos: teoria da utilidade multiatributos; métodos de sobreclassificação e métodos interativos. Roy (1985) e Pardalos *et al.* (1995) estabeleceram outra nomenclatura para esses métodos, sendo respectivamente:

- Métodos de critério único de síntese: apresentam a ideia de agregação compensatória, eliminando qualquer incomparabilidade, sendo baseados em Modelo Aditivo Determinístico e na Teoria da Utilidade (Keeney; Raiffa, 1976);
- Métodos de sobreclassificação, prevalência, superação e síntese (*outranking*): aceitam incomparabilidade e fundamentam-se na comparação par a par entre as alternativas. Destacam-se os métodos da Família ELECTRE e PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation*);
- Métodos interativos: abrangem problemas discretos ou contínuos, sendo representados pelos métodos PLMO (Programação Linear Multiobjetivo).

Por outro lado, os métodos multicritérios podem ser divididos em: compensatórios, nestes prevalecem à ideia de *trade-off*, ou seja, compensa um pior desempenho de uma ação em certo critério por um melhor desempenho em outro critério; e, não compensatórios, é o caso contrário, quando não há *trade-off* entre os critérios (De Almeida, 2013).

A presente pesquisa pauta-se no uso de três distintas abordagens metodológicas do escopo da exploração e tomada de decisão. Estas correspondem à técnica de grade de repertório, AHP e ELECTRE III, conforme anteriormente apontadas. Desta forma, o presente tópico almeja explicitar os conceitos basilares deste método, bem como evidenciar as justificativas para a sua aderência à proposta da pesquisa.

### 2.5.1 Técnica de grade de repertório

A técnica de grade de repertório consiste em um conjunto de procedimentos cujo objetivo é revelar os construtos usados por indivíduos quando interpretam seu ambiente (Gimenez *et al.*, 2007). Esta abordagem tem seus fundamentos associados à psicologia dos Construtos Pessoais (Kelly, 1955), pela qual explora e postula o subjetivismo inerente às declarações dos decisores. Estudos vêm sendo amplamente desenvolvidos na área da Administração neste contexto (Chandrasekar; Rehman, 2024; Gardiner *et al.*, 2024; Lemke *et al.* 2011).

Segundo Gardiner *et al.* (2024), para revelar construções pessoais, Kelly (1995) desenvolveu a técnica de grade de repertório como um meio de elicitar construtos por meio de um processo de entrevista pedindo aos participantes que agrupassem “elementos” do mundo em que vivem de acordo com similaridade/diferença e então explicassem seu agrupamento. Os elementos podem ser pessoas, eventos, objetos ou conceitos abstratos, dependendo da natureza do campo de pesquisa. Por meio de um procedimento envolvendo o agrupamento de elementos selecionados, a grade de repertório fornece informações que podem ser usadas para entender como uma pessoa dá significado à sua experiência e como ela antecipa eventos. Uma das principais vantagens da técnica de grade de repertório é que esta abordagem permite coletar opiniões pessoais dos entrevistados sem interferir em seu processo de construção de percepções (Crudge; Johnson, 2007).

De acordo com o guia “*The easy guide to repertory grids*” de Jankowicz (2005), uma obra seminal desta abordagem, o procedimento básico de elaboração da grade de repertório consiste em 10 etapas, apresentadas resumidamente abaixo:

1. Combine um tópico com o entrevistado e escreva-o na folha;
2. Combine um conjunto de elementos e escreva-os ao longo de uma linha no topo da planilha da grade;
3. Explique que você deseja saber como ele/ela pensa sobre os elementos, e que você fará isso pedindo a ele para compará-los sistematicamente.
4. Tomando três elementos (por exemplo: números 1, 3 e 5), pergunte ao entrevistado, “Quais destes dois são iguais de alguma forma e diferentes do terceiro?” Forneça garantia de que você não está procurando uma resposta “correta”, exatamente como ele/ela vê os elementos;
5. Pergunte ao seu entrevistado por quê: “O que os dois têm em comum, como oposto ao terceiro?” Escreva o que os dois têm em comum, na primeira linha em branco do lado esquerdo da planilha de grade; e o inverso disso (a razão pela qual o terceiro elemento é diferente) na mesma linha à direita da planilha de grade, certificando-se de que você obteve uma expressão verdadeiramente bipolar – um par de palavras ou frases que expressam um contraste. Este é o primeiro construto do entrevistado;
6. Verifique se você entende qual contraste está sendo expresso; use as palavras do entrevistado tanto quanto possível, mas sinta-se à vontade para discutir o que ele/ela quer dizer e negociar uma forma de palavras que faça sentido para ambos;
7. Apresente o construto como uma escala de avaliação, com a frase à esquerda numerada por “1” e a frase à direita representando o “5”;
8. Peça ao seu entrevistado para avaliar cada um dos três elementos na escala de 1 a 5, escrevendo as avaliações na grade conforme ele as declara;
9. Agora peça ao entrevistado para avaliar cada um dos elementos restantes neste construto. Ele/ela avaliou apenas três elementos até agora; agora para completar avaliando o resto;
10. Sua tarefa é extrair tantos construtos diferentes quanto a pessoa puder sobre o assunto. Então, repita as etapas 4 a 8, identificando um novo construto cada vez, até que seu entrevistado não possa oferecer nenhum novo; use uma tríade diferente de três elementos de cada vez: números 2, 4 e 6; então 1, 2 e 10, e assim por diante. Procure obter de 8 a 12 construtos ao todo.

A técnica de grade de repertório, desde a sua conjuntura inicial, vem ao longo dos tempos ganhando modificações. E, embora ajustes tenham sido propostos tanto no processo em

si quanto no desenho da grade, há três características principais desta abordagem que são comuns e permanecem constantes apesar de quaisquer modificações (Bauman, 2015):

1. Um conjunto de elementos (pessoas, objetos ou iniciativas que são avaliados);
2. Um conjunto de construtos (descrições dos entrevistados sobre as percepções dos elementos, também sendo chamado de critérios); e
3. Avaliação dos elementos pelos entrevistados com base nos construtos.

De acordo com Bauman (2015), o conjunto de elementos pode ser selecionado por um pesquisador e fornecido aos entrevistados, assim como pode ser desenvolvido por um grupo de entrevistados ou até mesmo selecionado pelos entrevistados individuais com base nos requisitos genéricos estabelecidos para um estudo. Os construtos podem ser coletados com base em tríade (um entrevistado analisa três elementos e determina como dois deles são semelhantes, mas ao mesmo tempo diferentes do terceiro elemento); díade (um entrevistado analisa dois elementos e determina o que os torna semelhantes e o que os torna diferentes); e autocaracterização (criação de uma imagem holística de um objeto em estudo). Finalmente, a avaliação dos elementos pode ser feita via método dicotômico, ou seja, coloca-se um elemento em um ou outro polo do construto marcando “Aplica-se” ou “Não se aplica” como uma marca de seleção. Uma segunda forma é pelo método ordinal (ou classificação), em que um respondente é solicitado a colocar os elementos em ordem de um polo do construto para outro de forma significativa. Ou também pode-se empregar um método de escala de classificação, pela qual um respondente é solicitado a classificar cada elemento na escala *Likert* de cinco, sete ou nove pontos. Bauman (2015) afirma que todas as variações mencionadas permitem ao pesquisador a flexibilidade de ajustar um método de acordo com o desenho de pesquisa e o objetivo principal do estudo.

Bastos Carvalhais Barroso *et al.* (2024) integram a técnica de grade de repertório com a análise de conteúdo de Honey, demonstrando rigor metodológico para coletar e analisar dados de entrevistas estruturadas. Esta metodologia enfatiza uma abordagem investigativa qualitativa combinada com interpretação estruturada e análise de dados, tornando-a replicável. A aplicação da técnica de repertório permite a identificação de atributos críticos enfatizados pelos entrevistados em relação ao tópico especificado (Bastos Carvalhais Barroso *et al.*, 2024). Além disso, Martins *et al.* (2024) mostraram que a combinação das duas técnicas pode fazer novas contribuições para o campo de operações e gestão da cadeia de suprimentos.

Diante dessa caracterização, é importante ponderar que em proposta similar à técnica da grade de repertório existem outras abordagens que alcançam resultados similares, a exemplo os mapas cognitivos e a análise de cluster. No entanto, a técnica da grade de repertório se mostrou de forma mais pontual aos objetivos do presente estudo devido à sua capacidade de identificar construtos pessoais de maneira direta e sistemática, sem uma necessidade de considerar relações causais, como necessário aos mapas cognitivos, e nem agrupar dados em categorias ou clusters predefinidos, como ocorre na análise de cluster.

### 2.5.2 AHP

O AHP (*Analytic Hierarchy Process*) é um método de decisão multicritério desenvolvido por Thomas L. Saaty na década de 1970. Este método é amplamente usado para resolver problemas complexos que envolvem múltiplos critérios ou alternativas, permitindo que decisões sejam tomadas de forma estruturada e lógica (Mathiyazhagan *et al.*, 2015; Azimifard *et al.*, 2018; Gupta *et al.*, 2021). Desta forma, o AHP mostrou-se como um mecanismo para suporte a decisão válido em áreas diversas, a citar, gerenciamento da qualidade, análise de custo e benefício, gestão de portfólio, avaliação de performance e planejamento de priorização estratégica (Gupta *et al.*, 2021; Santoso *et al.*, 2024; Xião *et al.*, 2025). De acordo com Saaty (1990), no método AHP, os fatores importantes para a decisão, uma vez selecionados, são organizados em uma estrutura hierárquica partindo-se de um objetivo geral para critérios, subcritérios e alternativas em níveis sucessivos.

O fundamento do AHP consiste na decomposição e síntese das relações entre os critérios até que se chegue a uma priorização dos seus indicadores, aproximando-se de uma melhor resposta de medição única de desempenho (Saaty, 1991). Segundo Vieira (2006), o método está construído sobre três princípios: (i) Construção de hierarquias: um problema complexo geralmente requer a estruturação dos critérios em uma hierarquia, por ser um procedimento natural do raciocínio humano. O AHP permite a estruturação dos critérios, sendo a estruturação em árvore a mais utilizada, na qual o critério de mais alto nível é decomposto a níveis mais detalhados; (ii) Definição de prioridades: tais prioridades são definidas a partir de comparações par a par dos elementos, à luz de determinado critério e (iii) Consistência lógica: o método permite, por meio da proposição de índices, avaliar a consistência da definição de prioridades, ou seja, é capaz de verificar a consistência dos julgamentos.

O AHP pauta-se na ideia de que os indivíduos, diante de suas características de racionalidade limitada, especialmente em suas atividades do dia a dia, encontram maior

facilidade em expressar suas preferências entre itens (por exemplo critérios de avaliação) recorrendo-se a mecanismos de julgamentos verbais comparativamente aos valores numéricos. Diante desta premissa, o AHP, pauta seus momentos de avaliação de modo por grau de importância, baseando-se numa relação entre números e termos linguísticos para auxiliar os tomadores de decisão na definição de prioridades. O Quadro 1 exibe a associação entre julgamentos verbais e a escala de intensidade de importância utilizada.

Quadro 1: Escala fundamental AHP

Intensidade de Importância	Pontuação	Forma de avaliação
1	Igual importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação à outra.
5	Importância grande ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação à outra.
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação a outra; sua dominação de importância pode ser demonstrada na prática.
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra, com o mais alto grau de certeza.
2, 4, 6, 8	Valores intermediários	Quando se procura uma definição de compromisso entre as duas definições.
Recíprocos dos valores acima de zero	Se a atividade i recebe uma das designações diferentes acima de zero, quando comparada com a atividade j, então j tem o valor recíproco quando comparada com i.	Uma designação razoável.
Racionais	Razões resultantes da escala	Se a consistência tiver de ser forçada para obter valores numéricos n, somente para completar a matriz.

Fonte: Saaty (1991)

Após a definição da estrutura hierárquica, realiza-se a comparação par a par entre os critérios, com o objetivo de determinar sua importância relativa. A Tabela 3 apresenta um exemplo de matriz de comparação paritária entre critérios específicos relacionados a um critério global genérico.

Tabela 3: Exemplo de matriz de comparações paritárias

Critério Global Genérico	Critério Específico "A"	Critério Específico "B"	Critério Específico "C"	Critério Específico "D"	Peso (média geométrica)	Peso normalizado $w_i$
Critério Específico "A"	1	4	1	0,5	1,189207	0,265
Critério Específico "B"	0,25	1	0,5	0,25	0,420448	0,093

Critério Específico “C”	1	2	1	1	1,189207	0,265
Critério Específico “D”	2	4	1	1	1,681793	0,375

Fonte: Elaboração própria (2024).

Para a matriz exposta na Tabela 3, o critério específico “A” é 4 (quatro) vezes mais importante que o critério específico “B”, por exemplo. Após o preenchimento da matriz de comparações paritárias obtém-se o vetor peso e o vetor peso normalizado, o qual indica a importância relativa de cada critério em relação aos demais. A principal forma de obtenção desse vetor é pelo método da média geométrica. Nesse método cada componente do vetor peso é calculado como a média geométrica dos elementos da respectiva linha divididos por um termo de normalização, conforme a Equação 1.

$$w_i = \frac{(\prod_{j=1}^n a_{ij})^{1/n}}{\sum_{i=1}^n (\prod_{i=1}^n a_{ij})^{1/n}} \quad \text{Equação 1}$$

Sendo:

- $w_i$ : peso normalizado do critério  $i$ ;
- $a_i$ : valor de importância do critério  $i$  em relação ao critério  $j$ .

A consistência é uma propriedade desejável; entretanto, um tomador de decisão raramente consegue fazer comparações de pares perfeitamente consistentes. Uma maneira de se avaliar o grau de consistência é através do cálculo do Resultado da Consistência — RC. Se o valor do RC for inferior a 0,1 o grau de consistência é satisfatório, mas se RC for superior a 0,1 podem existir problemas de inconsistência e o método AHP não deverá ser utilizado (Saaty, 1991). O cálculo de RC é definido pela Equação 2:

$$RC = \frac{\lambda_{\text{máx}} - n}{n - 1} / IR \quad \text{Equação 2}$$

Sendo:

- $n$  é a ordem da matriz; e
- $\lambda_{\text{máx}}$  é dado pela Equação 3:

$$\lambda_m = \text{média do vetor } \frac{Aw}{w} \quad \text{Equação 3}$$

Sendo:

- $A$  é a matriz de comparação paritária; e
- $w$  é o vetor peso.

O elemento IR é definido como Índice Randômico Médio, que varia com o tamanho da matriz, mostrado na Tabela 4 para matrizes de ordem 1 a 15. Esses valores foram determinados nos estudos seminais de Saaty (1991).

Tabela 4: Índice Randômico Médio do AHP em função do tamanho da matriz

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

Fonte: Saaty (1991)

Para a matriz exemplificada na Tabela 3 obteve-se o valor de RC igual a 0,045, inferior a 0,1, o que corresponde que o grau de consistência é satisfatório, portanto o método AHP pode ser utilizado.

Como apontado, o AHP está incluso no escopo dos métodos multicritério. Comparativamente, o AHP é particularmente útil quando há necessidade de hierarquizar os critérios e incorporar julgamentos qualitativos, conforme o caso da presente pesquisa. Assim, ressalta-se sua adaptabilidade em relação a outros métodos, como o PROMETHEE, que se baseia em funções de preferência e é mais adequado para problemas que requerem análises de superação direta, e o TOPSIS, que foca na proximidade às soluções ideais, mas não contempla hierarquias de maneira tão clara. Em termos de atribuições para a determinação de pesos aos critérios, o AHP também tem vantagens em relação a abordagens como o SRF (Figueira & Roy, 2002). Enquanto o SRF adota um enfoque mais técnico e matemático para determinar pesos a partir de funções aproximadas, o AHP permite uma interação direta dos decisores por meio de comparações pareadas. Essa interação não apenas facilita a coleta de dados subjetivos, mas também promove maior legitimidade e aderência dos resultados às percepções reais dos tomadores de decisão.

### 2.5.3 ELECTRE III

O método ELECTRE também está incluso nos métodos multicritério (MCDA), cuja natureza pauta-se em resolver problemas de decisão em vista a um conjunto de alternativas e a presença de critérios potencialmente conflitantes entre si. Assim, tendo-se um objetivo/meta

como alvo, avaliam-se as alternativas diante dos critérios a fim de obter um resultado, que por sua vez, permite vislumbrar a três diferentes tipos de problemas: a escolha (determinação de uma única alternativa vencedora), a classificação (alocação das alternativas em categorias previamente definidas) e a ordenação (ranqueamento das alternativas diante de sua ordem final de resultado) (Roy, 1996).

Uma das características principais, que distingue o ELECTRE de outros métodos multicritério, corresponde ao fato de não ser um método compensatório. Isto significa que bons resultados em alguns critérios não podem compensar um ou mais resultados muito ruins em outros critérios. Outra característica do ELECTRE é que permite a incomparabilidade. Incomparabilidade, que não deve ser confundida com indiferença, ocorre entre algumas alternativas a e b, quando não há evidência clara a favor de algum tipo de preferência ou indiferença (Roy; Bouyssou, 1993).

O ELECTRE, em termos procedurais, baseia-se na comparação par a par de alternativas para identificar as que são mais preferíveis com base em um conjunto de critérios. Em termos analíticos utiliza os conceitos de: Concordância, que mede o grau em que uma alternativa supera outra com base em critérios favoráveis; Discordância, que mede o grau em que uma alternativa é superada por outra com base em critérios desfavoráveis e Limiares, que definem tolerâncias para avaliar o grau de concordância e discordância (Roy, 1991).

Ao longo dos anos, para atender às diferentes demandas de soluções de problemas multicritérios, o ELECTRE evoluiu para as versões I, II, III, IV, IS e TRI (árvore da família ELECTRE) (Infante *et al.*, 2005). Todas essas versões são baseadas nos mesmos conceitos fundamentais, mas se diferenciam em termos operacionais e no tipo de problema de decisão a ser resolvido. A versão I é usada para problemas de seleção. As versões II, III e IV para problemas de classificação e a versão TRI, para soluções de problemas de atribuição (Infante *et al.*, 2005). As principais diferenças entre as versões, segundo Roy e Bouyssou (1993) são:

- A versão ELECTRE I foi projetada para tratar os problemas de seleção por meio de relações de sobreclassificação a partir de índices de concordância e discordância, mediante comparação entre pares. Por meio dessa versão, dentre tantas alternativas, pode-se retirar a melhor, diante da atuação nos critérios selecionados. Esse método utiliza pesos para ordenar a importância dos critérios.
- A versão ELECTRE II foi um aprimoramento da versão I, usada para ordenar alternativas (classificação) a partir de um conjunto de índices de concordância e

discordância associado à atribuição de pesos aos critérios. O intuito na utilização desse método não é escolher a melhor e sim classificá-las. Este método também utiliza pesos nos seus critérios;

- A versão ELECTRE III tem por finalidade ordenar alternativas, como a versão II. No entanto, nessa versão, Roy (1978) incorporou a metodologia fuzzy na construção do cálculo da ordenação de alternativas, permitindo a criação de pseudocritérios. A abordagem fuzzy dessa versão permite a incorporação das imprecisões e incertezas do processo de tomada de decisões, fixando os limiares de preferência e indiferença. A ordenação de alternativas da melhor para a pior é conseguida por meio da introdução de ponderações nos critérios. Por exemplo, para solucionar o problema de ordenação de um conjunto de equipamentos em função dos critérios de risco de segurança, riscos ao meio ambiente e perdas de produção, por meio do Electre III, pode-se incorporar o ponto de vista do usuário;
- A versão ELECTRE IV, assim como a versão III, tem como objetivo ordenar alternativas da melhor para a pior, no entanto, é empregada em problemas em que não se pode introduzir qualquer ponderação nos critérios e/ou em que o agente de decisão não queira determinar pesos ou critérios;
- A versão ELECTRE IS pode ser considerada também uma evolução da versão I; no entanto, essa versão se diferencia pelo fato de permitir que sejam aplicados pesos aos critérios e, ainda, permite formulações fuzzy;
- A versão ELECTRE TRI tem como objetivo a classificação de alternativas, no entanto não as ordena.

Com tais diferenciações, o ELECTRE III foi o selecionado para esta pesquisa, uma vez que tratamos de problemas voltados para a construção de um ordenamento de alternativas, por meio de análise de relações de sobreclassificação fuzzy, em que é permitida a introdução de ponderação de critérios. Este método se baseia em comparações aos pares que indicam o grau de dominância de uma alternativa ou grupo de alternativas sobre as restantes para cada critério de decisão (Nijkamp *et al.* 1990). O ELECTRE III não avalia apenas a melhor escolha, e isso não deve ser percebido como uma deficiência estrutural do método. Pelo contrário, apresenta uma classificação específica e deixa o último julgamento de seleção ao(s) decisor(es) (Ulubeyli; Kazaz, 2009).

O método requer que o decisor tenha a oportunidade em definir parâmetros específicos para cada critério de avaliação a ser computado na situação problema:

- Limiar de veto (v): Define o valor além do qual uma alternativa não pode ser considerada melhor que outra, mesmo que tenha bom desempenho em outros critérios.
- Limiar de preferência (p): Define o intervalo necessário para que uma alternativa seja preferida claramente à outra.
- Limiar de indiferença (q): Define um intervalo em que diferenças entre alternativas são consideradas insignificantes.

Os limiares de veto (v), indiferença (q) e preferência (p) devem ser definidos como a expressão  $v_j(g_j(*)) \geq p_j(g_j(*)) \geq q_j(g_j(*))$  pelo(s) decisor(es) para todos os critérios, considerando que o nível de desempenho de uma das opções seja representado por  $g_j(*)$  para o j-ésimo critério. Os valores limite nos métodos da família ELECTRE podem ser aceitos como uma espécie de tolerância. Para cada par de alternativas (a, b), calcula-se o grau de sobreclassificação, considerando: (i) Pesos dos critérios; (ii) Desempenho das alternativas em cada critério; e (iii) Limiares de indiferença, preferência e veto. A matriz de sobreclassificação é composta pelos índices que medem a intensidade com que uma alternativa “a” sobreclassifica outra “b” (Vincke, 1992).

Em termos dos fundamentos do ELECTRE, o índice de concordância,  $C(a,b)$ , é calculado para cada par de alternativas (a, b). Desta forma, o  $C(a, b)_j$  simboliza o índice de comparação individual, e  $w_j$  o peso de cada critério. A matriz de concordância C, que não é simétrica em geral, é composta por estes índices de concordância. A fórmula típica é esta (Buchanan *et al.* 1998; Vincke, 1992):

$$C(a, b) = \frac{\sum_{\text{critérios } g_j, \text{ onde } g_j(a) \geq g_j(b)} w_j}{\sum w_j}$$

Onde  $w_j$  são os pesos dos critérios.

Tal como no índice de concordância, os índices de discordância constituindo a matriz de discordância D também têm um valor de 0 a 1. A função de Discordância mede se há uma diferença significativa desfavorável que comprometa a preferência de a sobre b. O índice de discordância é calculado comparando o desempenho em critérios onde “b” é significativamente melhor que “a” (Vincke, 1992).

Em toda situação em que “*a*” supera “*b*”, para “*a*” é dado a pontuação +1 (força) e “*b*” recebe -1 (fraqueza). Os elementos  $P^+$ ,  $P^-$ , I e R são utilizados para descrever relações preferenciais entre alternativas, especialmente ao interpretar as relações de dominância na matriz de sobreclassificação. Essas relações são derivadas do grau de concordância, grau de discordância e dos limiares aplicados. Cada um dos elementos tem o seguinte conceito (Vincke, 1992):

- $P^+$ : Preferência forte (*Strict preference*) - Indica que a alternativa (linha) é claramente preferida em relação à alternativa (coluna);
- $P^-$ : Preferência fraca ou moderada (*Weak preference*) - Indica que a alternativa (linha) é levemente preferida em relação à alternativa (coluna), mas a preferência não é forte;
- I: Indiferença (*Indifference*) - Indica que as alternativas (linha) e (coluna) são consideradas equivalentes ou indistinguíveis com base nos critérios avaliados;
- R: Incomparabilidade (*Incomparability*) - Indica que as alternativas (linha) e (coluna) não podem ser comparadas diretamente devido a contradições ou falta de informações.

Conhecendo os índices de concordância e discordância, é possível determinar a matriz de credibilidade, a qual mede quão forte é a afirmação  $aSb$  (Buchanan *et al.* 1998). Assim, segundo Vincke (1992), o grau de sobreclassificação pode ser definido pela Equação 1.

$$S(a, b) = \left\{ \begin{array}{l} C(a, b) \\ \prod_{j \in J(a, b)} \frac{1 - D_j(a, b)}{1 - C(a, b)}, \text{ caso contrário} \end{array} \right\} \text{Equação 1}$$

onde  $J(a, b)$  é o conjunto de critérios que satisfazem

O grau de sobreclassificação é igual ao índice de concordância quando não há discordância para nenhum critério. Finalizada a matriz de credibilidade tem-se a segunda fase do ELECTRE III, que consiste na exploração da relação de sobreclassificação, sendo alcançadas duas pré-ordens completas. Para obter a primeira pré-ordem é aplicado o procedimento da destilação descendente, que consiste no algoritmo (De Almeida, 2013):

- Partindo do conjunto A, seleciona-se a melhor alternativa  $aj$ , denominada de primeira destilação D1.
- A alternativa em D1 é retirada do conjunto A, que por sua vez, recebe o nome de A’;
- Repetem-se os procedimentos 1 e 2 sobre A’ remanescente, obtendo a destilação D2 e assim sucessivamente até descobrir a alternativa com pior desempenho.

Caso D1 tenha mais de uma alternativa, realiza-se o procedimento anterior até que reste única alternativa. Prosseguindo, a segunda pré-ordem é obtida pela destilação ascendente, um processo que seleciona as opções com menor desempenho (De Almeida, 2013).

Assim, determina-se um valor  $\lambda$ , o qual será o máximo valor da matriz de credibilidade ( $\lambda = \text{Max } S(a,b)$ ), sendo também definido um coeficiente de “relaxamento” para  $\lambda$ , sendo  $\lambda - s(\lambda)$ , onde  $s(\lambda)$  corresponde ao limiar que permite a seleção de valores próximos de  $\lambda$  (Vincke, 1992). Complementando, De Almeida (2013) pondera que na literatura tem-se a recomendação de usar  $s(\lambda) = 0,3 - 0,15\lambda$ , de modo que “ $a$  é  $\lambda$  preferível a  $b$ ”, se  $S(a,b)$  é aceita.

Finalizado esses procedimentos, faz-se necessário verificar a robustez dos resultados. Essa análise é realizada variando-se os parâmetros, pesos e limites de preferência, indiferença e veto estabelecidos inicialmente, visando determinar o domínio de variação nos resultados (Maystre *et al.* 1994).

Gastélum-Chavira *et al.* (2024) apresentaram um processo de seleção de baristas em uma cafeteria mexicana usando o ELECTRE-III para modelar as preferências de um tomador de decisão. Os resultados mostram a relevância de combinar modelagem de preferência com métodos de análise multicritério para tomada de decisão. Garcia-Gastelum *et al.* (2024) também aplicaram o ELECTRE III para avaliar 190 países com base nas preferências do tomador de decisão, dando importância diferente a dez critérios considerados no estudo *Doing Business* 2020 do Banco Mundial. Os resultados com esta metodologia mostram nações mais bem posicionadas no ranking em comparação com o relatório apresentado pelo Grupo Banco Mundial.

Em termos de uso do ELECTRE III, comparativamente a outros métodos multicritério com finalidade similar, destaca-se por ser projetado para lidar com situações de imprecisão, permitindo que os decisores expressem suas preferências de maneira mais flexível, com o uso de limiares de indiferença, preferência e veto. Assim, diferentemente do PROMETHEE, que recorre ao uso das funções de preferências, o ELECTRE III possibilita maior precisão em cenários de natureza imprecisa diante de sua ordenação das alternativas baseados em fundamentos de classificação *fuzzy*.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 Caracterização da pesquisa

A presente pesquisa pode ser enquadrada como uma abordagem prescritiva e de natureza aplicada. A perspectiva prescritiva se deve à forma de ciência orientada para a ação, comum no *Design Science Research*, que se preocupa com o desenvolvimento de recomendações sobre como resolver problemas práticos (“como”) (Ahlemann *et al.*, 2013). Os resultados da pesquisa prescritiva geralmente são aplicados na prática, ainda que requeira adaptação para levar em conta contingências do ambiente de uso, como é o caso do framework desenvolvido nesta pesquisa.

A coleta de dados da pesquisa contou com a participação voluntária de 13 profissionais de expressiva experiência no setor da mineração, motivo pelo qual foram selecionados. Tais participantes fazem parte das áreas de Sustentabilidade, Tecnologia da Informação, Automação, Otimização, Planejamento das Operações e Estratégia e Gestão na mineradora objeto de pesquisa. Foram identificadas e registradas somente informações para caracterização dos perfis, tais como formação, área de atuação, cargo, tempo de empresa, gênero e faixa etária, não incorrendo em riscos de identificação de suas respostas no resultado da pesquisa.

Pode-se afirmar que a pesquisa apresenta uma proposta ontológica realista, em virtude da forma de entender o posicionamento real dos fatos. A epistemologia, forma de entender como o conhecimento é gerado, tende a proposta objetivista. O paradigma é positivista, o método é prescritivo de natureza aplicada e a técnica de coleta de dados se faz por questionários e entrevistas, conforme a Figura 8 (Saccol, 2009).

Figura 8: Detalhamento da pesquisa

ONTOLOGIA Forma de entender como as coisas são	EPISTEMOLOGIA Forma de entender como o conhecimento é gerado	PARADIGMA DE PESQUISA Instância filosófica que informa a metodologia de pesquisa	MÉTODO Estratégia, plano de ação ou desenho de pesquisa	TÉCNICAS DE COLETA E ANÁLISE DE DADOS Técnicas e procedimentos para coletar e analisar dados
- Realista	➡ - Objetivista	➡ - Positivista	➡ - Prescritiva	➡ - Questionários - Entrevistas

Fonte: Adaptado de Saccol (2009).

O objeto de pesquisa deste estudo é uma empresa brasileira de grande porte no setor de mineração, com operações voltadas à extração e beneficiamento de minério de ferro, um insumo essencial para a indústria siderúrgica global. Com forte presença no mercado internacional, seus

produtos são exportados para diversos países, consolidando sua posição estratégica no setor. A organização se destaca pelo uso de tecnologias avançadas e por processos produtivos em larga escala, o que reforça sua relevância para a indústria e o contexto da pesquisa.

Dada sua representatividade, o estudo conduzido busca ser amplo, abrangente e profundo, permitindo uma análise detalhada dos desafios e oportunidades enfrentados pela empresa, especialmente no que tange à adoção de soluções tecnológicas e práticas sustentáveis. Além do impacto econômico expressivo, a empresa está inserida em um cenário de desafios ambientais e sociais significativos, o que a torna um caso relevante para reflexões sobre sustentabilidade, gestão de riscos e responsabilidade corporativa. Dessa forma, os insights obtidos podem contribuir para o desenvolvimento de diretrizes aplicáveis a outras organizações do setor, ampliando o impacto e a aplicabilidade dos resultados da pesquisa.

### **3.2 Metodologia integrada: Etapas e abordagens combinadas**

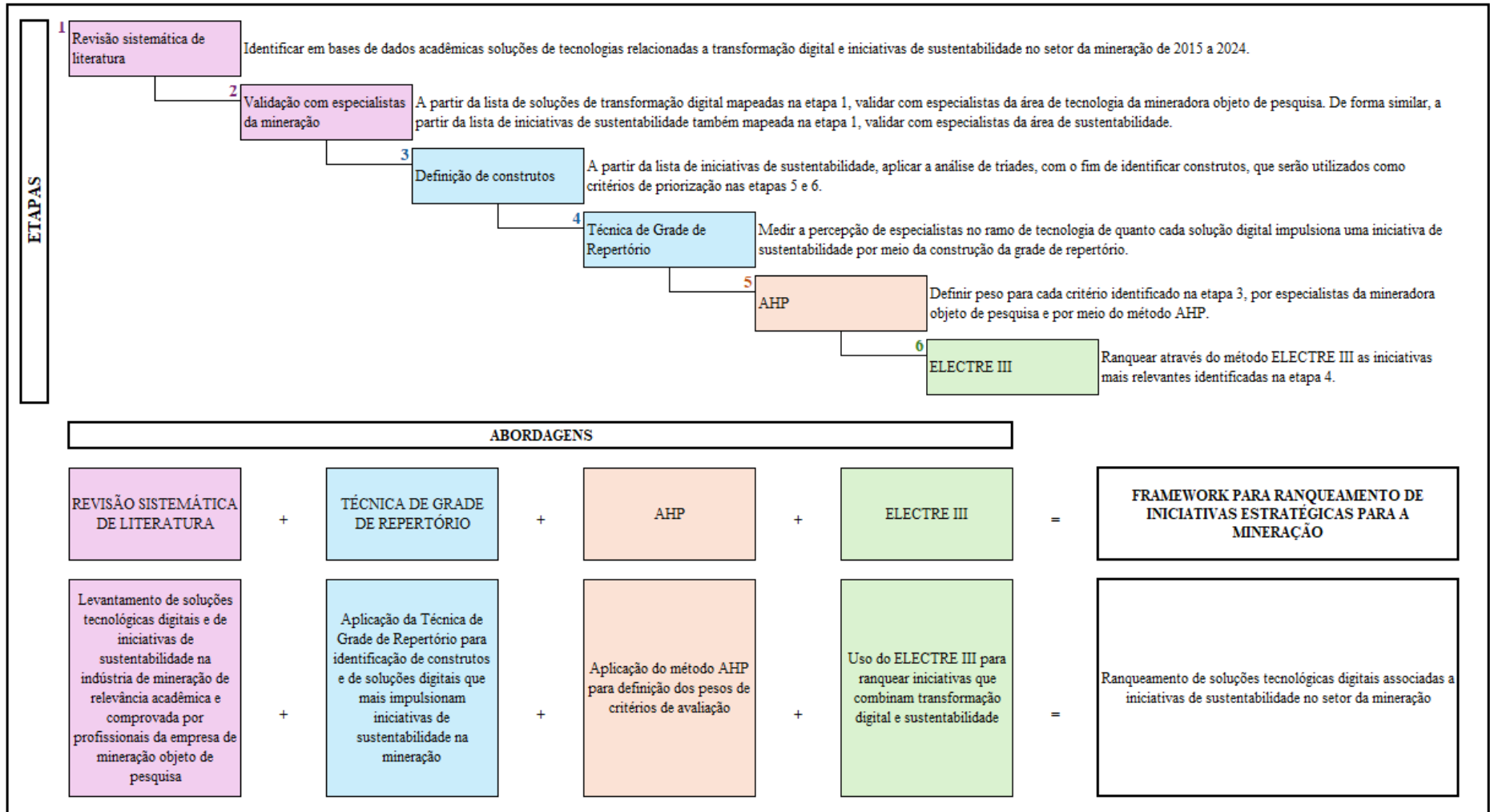
Os procedimentos metodológicos estão divididos em seis etapas e combinam quatro abordagens diferentes, conforme o fluxo evidenciado na Figura 9. Desta forma, há etapas completamente voltadas à exploração temática, compreendendo mecanismos de cunho qualitativo (etapas 1 a 4) e etapas direcionadas a resolução pontual sob o item analisado, recorrendo-se a métodos quantitativos (etapas 5 e 6).

Segundo Kitchenham (2004), uma RSL é um meio de identificar todas as pesquisas disponíveis relevantes para uma questão de pesquisa específica, área temática, ou fenômeno de interesse, razão pela qual esta foi a primeira abordagem adotada nesta pesquisa. Segundo a autora, uma revisão sistemática da literatura é composta por três fases: planejamento, condução e relato da revisão. As etapas associadas ao planejamento da revisão são: (i) identificação da necessidade e (ii) desenvolvimento de um protocolo. As etapas associadas à condução da revisão são: (i) identificação da pesquisa; (ii) seleção dos estudos primários; (iii) avaliação da qualidade do estudo; (iv) extração e monitoramento de dados e (v) síntese de dados. O relato da revisão é uma fase de estágio único.

Neste estudo foi utilizado o diagrama de fluxo contido no conjunto de ferramentas PRISMA - *Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses*. Este diagrama de fluxo descreve o fluxo de informações através das diferentes fases de uma revisão sistemática. Ele mapeia o número de registros identificados, incluídos e excluídos, e os motivos das exclusões (<https://www.prisma-statement.org/prisma-2020>). Segundo Page *et al.* (2021), a ferramenta PRISMA foi desenvolvida para facilitar o relato transparente e completo de revisões

sistemáticas, uma vez que os métodos e resultados de revisões sistemáticas devem ser relatados em detalhes suficientes para permitir que os usuários avaliem a confiabilidade e aplicabilidade dos resultados.

Figura 9: Etapas e abordagens da metodologia



Fonte: Elaboração própria (2024)

Especificamente nesta pesquisa, a RSL foi empregada utilizando o diagrama de fluxo PRISMA com o objetivo de identificar as pesquisas disponíveis relevantes relacionadas à sustentabilidade e transformação digital no setor da mineração. Esta abordagem está sendo comumente empregada dentro destas temáticas (Reis *et al.*, 2018; Ranängen; Lindman, 2017; Barnewold; Lottermoser, 2020). Além disso, foram utilizadas as bases de dados *SCOPUS* e *Web of Science*, as duas principais bases de dados globais, que emergem como ferramentas essenciais para a pesquisa acadêmica, oferecendo vastos repositórios de artigos de periódicos, conferências, livros e outros materiais científicos (da Costa *et al.*, 2023).

Diante das iniciativas de sustentabilidade e das soluções de transformação digital identificadas na literatura científica, a segunda etapa consistiu em uma validação por especialistas da mineração, especificamente da mineradora objeto de pesquisa, através de entrevistas, com o fim de verificar se tais informações são realmente pertinentes e relevantes para o setor em estudo. Em seguida desta entrevista, foi realizada, junto aos especialistas, a análise de tríades de elementos para identificação de construtos, típico passo da técnica de grade de repertório, com o objetivo de definir os critérios para o ranqueamento das iniciativas na etapa seis.

A quarta etapa se trata da medição, via escala tipo *Likert*, da percepção dos especialistas do ramo de tecnologia no setor da mineração, em relação ao quanto cada solução de transformação digital impulsiona uma iniciativa de sustentabilidade por meio da construção da grade de repertório, sendo iniciativas elementos e soluções construtos. Esta etapa da pesquisa permite a medição da interação entre solução digital e sustentabilidade, o que possibilitará identificar as combinações mais intensas entre as duas temáticas, aquelas cuja iniciativa de sustentabilidade é mais impulsionada pela tecnologia digital.

Na quinta etapa, retomaram-se os construtos obtidos na etapa três, e através do método AHP, especialistas do setor definiram pesos para cada um dos critérios. Esta etapa é uma premissa para a realização do passo subsequente, o ranqueamento das iniciativas combinadas por meio do método ELECTRE III, o qual permite a construção de um ordenamento de alternativas, por meio de análise de relações de sobreclassificação fuzzy. Essas seis etapas do procedimento metodológico são detalhadas em sequência.

### **3.3 Etapa 1: Revisão Sistemática de Literatura**

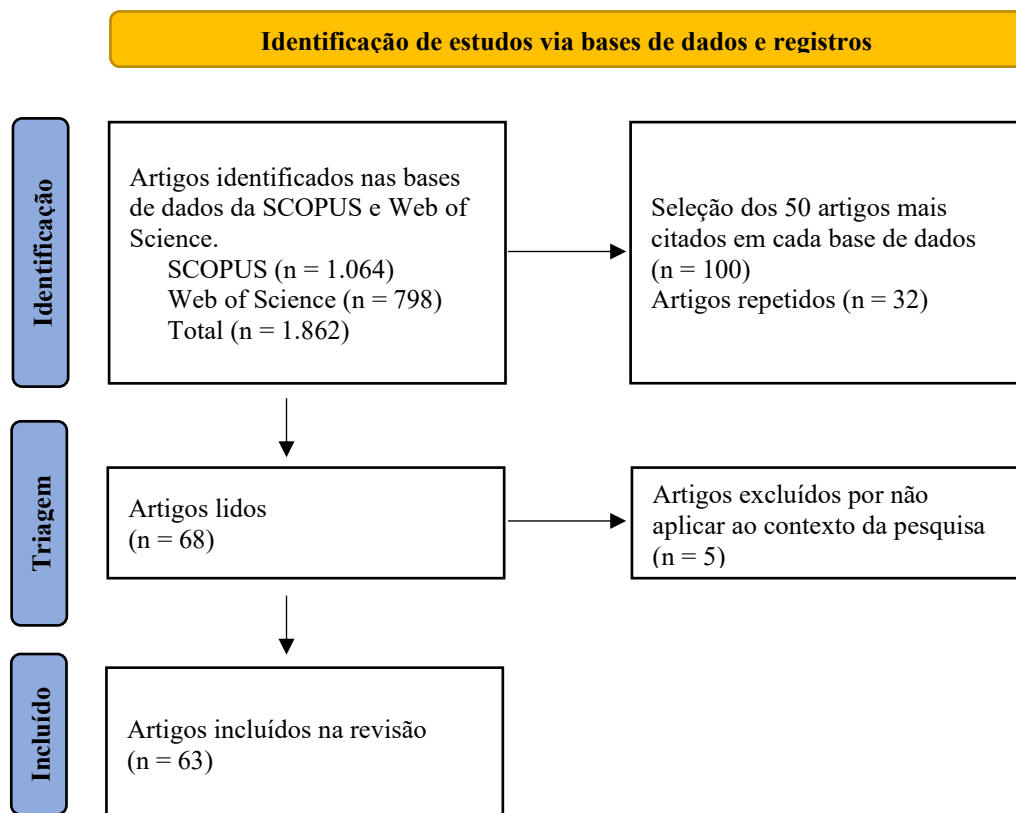
Na etapa da RSL, foi realizado o levantamento de artigos a partir das bases de dados *SCOPUS* e *Web of Science* (*Wos*) em dois distintos momentos: (i) para identificar artigos de

sustentabilidade e (ii) para identificar artigos de transformação digital, ambas as pesquisas sob o âmbito do setor da mineração.

### 3.3.1 Sustentabilidade

Em vista a explorar a temática da sustentabilidade na mineração, a *string* de busca estabelecida foi [“*mining industry*” and “*sustainab\**”], pautando-se nas variáveis campo *Article Title*, *Abstract*, *Keyword* na *SCOPUS* e *Topic* na *Wos*. Na própria filtragem foi considerado o período de publicação de 2015, ano em que a ONU estabeleceu os dezessete ODS e divulgou a agenda 2030, a 2024, ano de realização da pesquisa, documentos em língua inglesa e do tipo Artigo. Inicialmente, o total obtido de artigos foi 1.862, sendo 1.064 na *SCOPUS* e 798 na *Wos*. Desta forma, para uma homogeneização da amostra, foram realizadas três etapas de filtragem ao longo do processo de busca até chegar na base final utilizada na pesquisa. Através do método PRISMA, tornam-se mais explícitos os passos realizados, conforme Figura 10.

Figura 10: PRISMA para artigos de Sustentabilidade

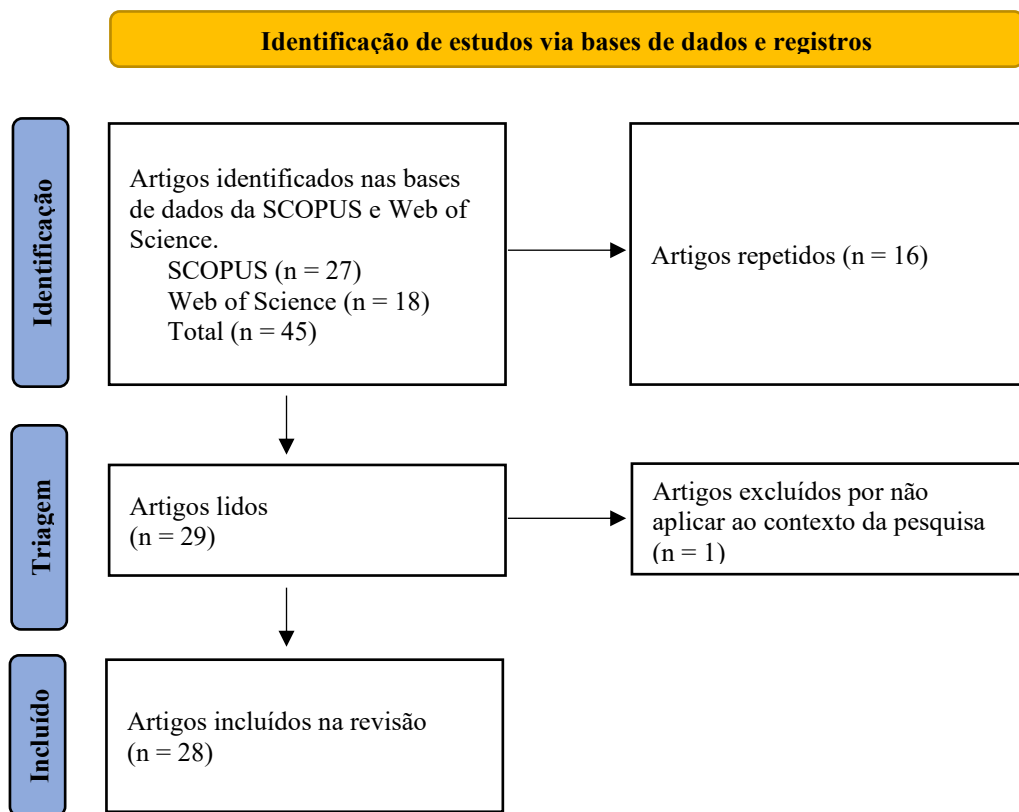


Fonte: Adaptado de [www.prisma-statement.org/](http://www.prisma-statement.org/) (2025)

### 3.3.2 Transformação Digital

De forma similar, foi desenvolvida a busca por artigos científicos relacionados a transformação digital na mineração. Pautando-se também nas semelhantes variáveis de busca, seja no campo *Article Title, Abstract, Keyword* na *SCOPUS* e *Topic* na *Web of Science*: a string de busca ["*mining industry*" and "*digital transformation*"] apoiou esse processo. O período de publicação considerado foi de 2015 a 2024, também vinculado aos ODS da ONU e à data da pesquisa, o idioma foi inglês, e o tipo de documento, artigo. Os passos recorridos nesta revisão de literatura são os apresentados na Figura 11.

Figura 11: PRISMA para artigos de transformação digital



Fonte: Adaptado de [www.prisma-statement.org/](http://www.prisma-statement.org/) (2025)

Ao total, foram lidos 91 artigos, sendo 63 sobre sustentabilidade e 28 sobre transformação digital no setor da mineração. A partir desta leitura, foram mapeadas iniciativas de sustentabilidade que estão sendo implementadas no setor da mineração assim como as soluções tecnológicas de transformação digital, que vem sendo aplicadas no mesmo setor.

### 3.4 Etapa 2: Validação com especialistas

Para validação das iniciativas de sustentabilidade e de transformação digital mapeadas na RSL foram convidados quatro especialistas nestas duas temáticas da empresa objeto de pesquisa. As características de perfil desses especialistas estão expressas no Quadro 2:

Quadro 2: Perfis dos participantes da etapa 2

Participante	Formação	Área de atuação	Cargo	Anos de empresa	Gênero	Faixa etária
1	Bióloga	Sustentabilidade	Analista Sr.	11	F	31-40
2	Cientista Social	Desempenho de Sustentabilidade	Coordenadora	9	F	41-50
3	Mestre em Engenharia Elétrica e Automação	Núcleo de Otimização	Coordenador	10	M	31-40
4	Cientista da Computação	Tecnologia da Informação	Coordenador	3	M	41-50

Fonte: Elaboração própria (2025).

Em termos de procedimento, inicialmente foi realizado um contato para explicar a atividade a ser realizada. Em seguida foi enviada via e-mail uma lista com as iniciativas e soluções mapeadas às especialistas na área de sustentabilidade e aos especialistas na área de tecnologia e automação, respectivamente, para análise antecipada. Finalmente foi agendada uma entrevista para conhecimento e entendimento da validação.

Em termos de execução, as entrevistas tiveram duração de aproximada de 1 hora, cada, e, ocorreram através do *software Microsoft Teams*, sendo gravada e transcrita para facilitar a análise de resultados. Assim, a entrega desta etapa constituiu nas duas listas, inicialmente mapeada através da RSL, mas agora validadas pelos especialistas do setor da mineração.

### 3.5 Etapas 3 e 4: Técnica de Grade de Repertório

A Técnica da Grade de repertório foi aplicada com dois objetivos: (i) para identificar, por meio da percepção de especialistas em tecnologia do setor, o quanto cada solução tecnológica impulsiona cada iniciativa de sustentabilidade de acordo com a escala *Likert* de 5 pontos; e (ii) para identificar os construtos, ou seja, critérios que os entrevistados utilizam para comparar e diferenciar iniciativas de sustentabilidade, que constituem os elementos na grade de repertório.



Inicialmente, foram feitas conversas individualizadas com cada um dos participantes para explicar a atividade a ser realizada. Foi solicitada aos especialistas a avaliação dos elementos, no *range* de 1 a 5, de cada interseção entre solução de transformação digital e iniciativa de sustentabilidade (grade de repertório da Figura 12), de acordo com os conhecimentos de o quanto a solução impulsiona a iniciativa de sustentabilidade. Em termos de significados da escala, pontua-se o Quadro 4.

Quadro 4: Escala Likert de 5 pontos para avaliação

AVALIAÇÃO	
Nota de avaliação	Esta solução Tecnológica de Transformação Digital impulsiona...
1	Pouquíssimo
2	Pouco
3	Médio
4	Muito
5	Muitíssimo
	...esta iniciativa de Sustentabilidade

Fonte: Elaboração própria (2025)

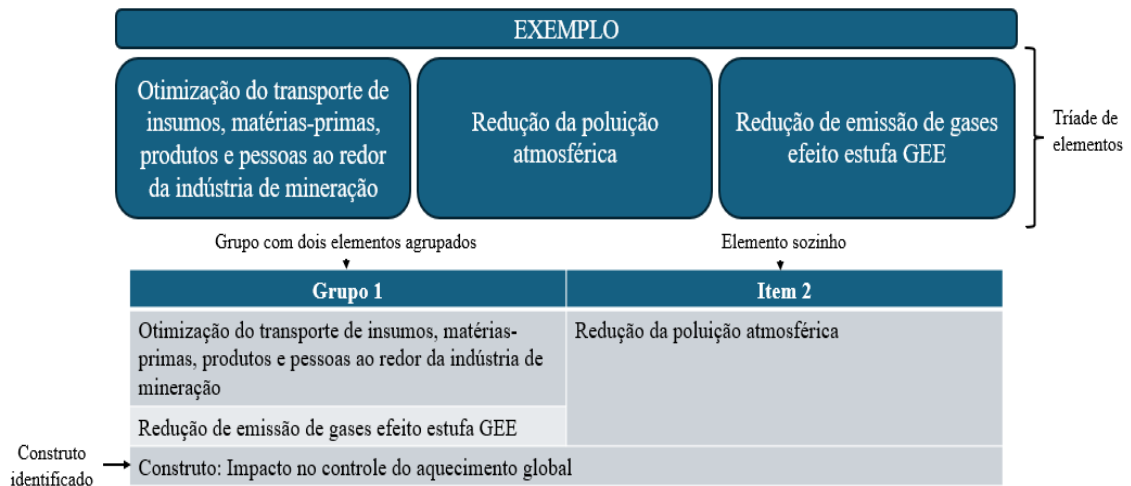
Após explicações dadas, cada participante teve o período máximo de sete dias para realizar as análises e retornar à avaliação por e-mail. Neste período, o analista do processo (autor da pesquisa) esteve a todos os instantes disponível para tirar dúvidas, caso necessário. De posse das cinco avaliações, elas foram consolidadas e a entrega desta etapa consistiu na identificação das combinações das soluções de transformação digital que mais impulsionam a realização das iniciativas de sustentabilidade sob a perspectiva dos cinco especialistas participantes. Foram então selecionadas as combinações cuja somatória das avaliações dos cinco participantes fosse maior ou igual a 24. Esta lista será utilizada na etapa 6.

### 3.5.2 Identificação de construtos via técnica de Grade de repertório

A técnica de grade de repertório também foi empregada para identificação de construtos, ou seja, identificação dos critérios que serão utilizados na etapa de ranqueamento das iniciativas através do método ELECTRE III pelo participante da alta liderança da empresa. Utilizou-se a técnica com os participantes 1, 2, 3 e 4 após a etapa 2. Ao finalizar a validação, foram apresentadas a cada um tríades de iniciativas de sustentabilidade (ao 1 e 2) e de soluções de transformação digital (ao 3 e 4), e foi solicitado aos participantes que agrupassem dois elementos de um lado e um separado. Com isso feito, foi questionado o motivo da separação e,

desta forma foram elicitados os construtos. A Figura 13 mostra um exemplo de definição de construtos a partir da tríade de elementos apresentados.

Figura 13: Exemplo de análise de tríades



Fonte: Elaboração própria (2025)

A entrega desta etapa representou uma lista de critérios potenciais para utilização na etapa 5 e 6.

### 3.6 Etapa 5: Método AHP - Pesos dos critérios

Diante do conjunto de critérios, surge a necessidade de definir os respectivos pesos, ou seja, a atribuição do grau de importância desse atributo avaliativo diante da concretização da problemática sob análise. Desta forma, foi cooptada a participação de novos especialistas. Neste caso foram convidados três profissionais da área de planejamento para fazer a comparação em pares de todos os sete critérios. Em termos de ferramenta, foi utilizada a calculadora AHP, (<https://bpmsg.com/ahp/>). Os perfis dos três participantes podem ser vistos no Quadro 5.

Quadro 5: Perfis dos participantes da etapa 5

Participante	Formação	Área de atuação	Cargo	Anos de empresa	Gênero	Faixa etária
10	Engenheira de Produção	Planejamento	Engenheira de Planejamento Sr.	4	F	31-40
11	Engenharia de Produção	Planejamento	Engenheira de Planejamento Sr.	27	F	41-50
12	Engenheiro Mecânico	Planejamento	Gerente	11	M	41-50

Fonte: Elaboração própria (2025)

Em termos de procedimentos, cada participante foi convidado para uma reunião via *Microsoft Teams*. Neste momento, foi aberta a plataforma online da calculadora AHP, incluído os sete critérios e compartilhada a tela para início da comparação em pares. Para cada par de critério foi questionado a cada participante qual dos dois critérios era o mais importante e quantas vezes mais na escala de 1 a 9. Ao finalizar as comparações, foi calculado o índice de consistência CR, do inglês *Consistency Ratio*. Caso o CR apresentasse valor maior que 10%, solicitavam-se as alterações sugeridas pela própria calculadora, com o fim de aumentar o índice de consistência e melhorar a precisão da coerência.

### 3.7 Etapa 6: ELECTRE III – Ranqueamento

Aproximando-se das últimas etapas da metodologia empregada na pesquisa, foi solicitado ao gerente geral de estratégia da empresa a avaliação da lista de soluções de transformação digital combinadas com as iniciativas de sustentabilidade obtida na etapa 4 por meio dos critérios com seus respectivos pesos obtidos na etapa 5. O perfil deste participante é detalhado no Quadro 6.

Quadro 6: Perfil do participante da etapa 6

Participante	Formação	Área de atuação	Cargo	Anos de empresa	Gênero	Faixa etária
13	Engenheiro Químico	Planejamento Estratégico, Inovação e Tecnologia de Informação	Gerente Geral	13	M	41-50

Fonte: Elaboração própria (2025)

Em vista aos procedimentos, foi realizada uma reunião presencial com o participante 13 e explicada a origem da matriz de iniciativas versus critérios, que pode ser vista na Figura 14.

Figura 14: Exemplo de matriz de avaliação dos critérios

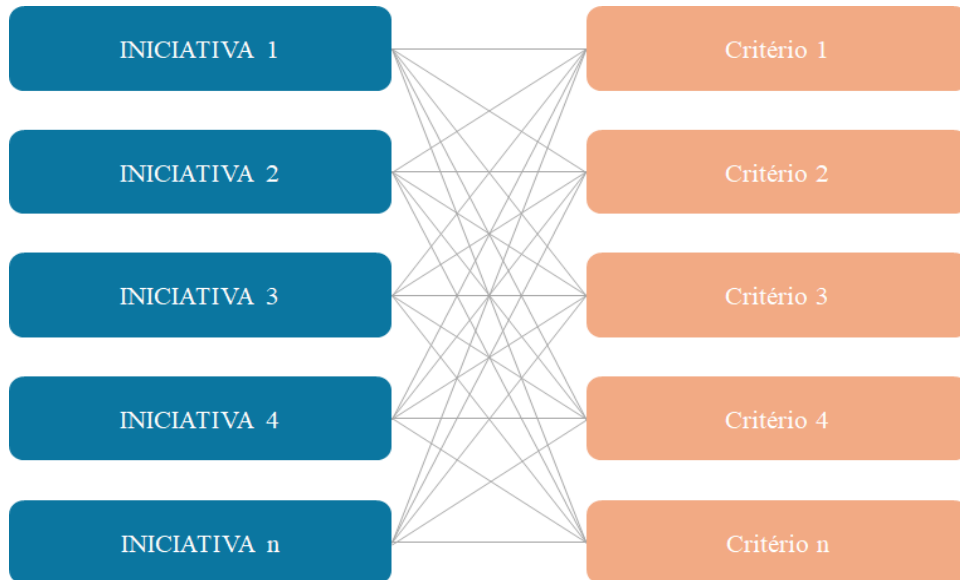
Iniciativas ↓		Critérios						
		P1%	P2%	P3%	P4%	P5%	P6%	P7%
#	Lista Combinada de Solução de Transformação Digital e Iniciativa de Sustentabilidade	Critério 1	Critério 2	Critério 3	Critério 4	Critério 5	Critério 6	Critério 7
1	Iniciativa 1 (Tecnologia digital + Sustentabilidade)							
2	Iniciativa 2 (Tecnologia digital + Sustentabilidade)							
3	Iniciativa 3 (Tecnologia digital + Sustentabilidade)							
4	Iniciativa 4 (Tecnologia digital + Sustentabilidade)							
5	Iniciativa 5 (Tecnologia digital + Sustentabilidade)							
6	Iniciativa 6 (Tecnologia digital + Sustentabilidade)							
7	Iniciativa 7 (Tecnologia digital + Sustentabilidade)							
8	Iniciativa 8 (Tecnologia digital + Sustentabilidade)							
9	Iniciativa 9 (Tecnologia digital + Sustentabilidade)							
10	Iniciativa 10 (Tecnologia digital + Sustentabilidade)							

Regras de avaliação  
Avaliar de 1 a 5 cada iniciativa de acordo com o conceito do critério

Fonte: Elaboração própria (2025)

Foi então, solicitada a avaliação de 1 a 5 para cada iniciativa em cada critério, conforme esquema da Figura 15.

Figura 15: Esquema de avaliação iniciativas e critérios



Fonte: Elaboração própria (2025)

Com a atividade esclarecida, foi dado ao participante 13 o tempo de 15 dias para realização da análise e retorno da matriz preenchida. A partir dos dados da avaliação, foi utilizada a ferramenta J-ELECTRE-v3.0 – [github.com/Valdecy](https://github.com/Valdecy) para o ranqueamento das iniciativas. A entrega final da sexta etapa é o ranqueamento das iniciativas através do método ELECTRE III.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados desta pesquisa serão apresentados em etapas, seguindo a metodologia delineada. Primeiramente, para a RSL que abordou os dois subtemas, Sustentabilidade e Transformação Digital, serão exibidas as listas de iniciativas de sustentabilidade e soluções tecnológicas digitais mapeadas em artigos acadêmicos. Em seguida, o Tópico 4.2 detalhará o processo de validação dessas listas, realizado por meio do conhecimento de especialistas.

O Tópico 4.3 demonstra os resultados diante da aplicação da técnica de grade de repertório, que permitiu a identificação das soluções de transformação digital mais relevantes para impulsionar as iniciativas de sustentabilidade, culminando em uma lista combinada de soluções tecnológicas para as iniciativas sustentáveis. Esta mesma técnica foi utilizada para a definição de critérios para o ranqueamento, conforme os detalhes apontados no Tópico 4.4. Os pesos de cada critério, obtidos pelo método AHP, serão mostrados no Tópico 4.5. O ranqueamento final, realizado pelo método ELECTRE III, será discutido no tópico 4.6, incluindo reflexões do gestor participante. A jornada se encerra com a construção do framework de decisão estratégica que integra tecnologias digitais e sustentabilidade no setor da mineração, que será explicitado no tópico 4.7.

### 4.1 Revisão sistemática de literatura (RSL)

A RSL foi a abordagem utilizada para identificar iniciativas de sustentabilidades e soluções tecnológicas de transformação digital implementadas no setor da mineração. Conforme o Tópico 3.3 foram selecionados 63 artigos de sustentabilidade e 28 de transformação digital. Os 91 artigos foram lidos na íntegra e, a partir de cada um deles, foram extraídas as possíveis iniciativas e soluções. Os resultados obtidos a partir das leituras serão apresentados nos Tópicos 4.1.1 e 4.1.2, respectivamente.

#### 4.1.1 Sustentabilidade

Foram estudados os 63 artigos de sustentabilidade no setor da mineração priorizados nas bases de dados *Scopus* e *WoS*. Deste total de artigos, 15 são oriundos da base *Scopus*, 16 exclusivamente da *WoS* e 32 são comuns nas duas bases de dados. Após as leituras, foram mapeadas uma ou mais iniciativas de sustentabilidade em cada um dos artigos, conforme apresentado no Quadro 7, totalizando 20 iniciativas.

Quadro 7: Lista de iniciativas de sustentabilidade obtidas a partir da RSL

#	Base	Referência	Iniciativa
1	Scopus e WoS	Adiansyah, J. S. et al. A framework for a sustainable approach to mine tailings management: disposal strategies. <b>Journal of cleaner production</b> , v. 108, p. 1050-1062, 2015.	Gerenciamento de rejeitos de mineração
2	Scopus e WoS	Owen, J. R. et al. Catastrophic tailings dam failures and disaster risk disclosure. <b>International journal of disaster risk reduction</b> , v. 42, p. 101361, 2020.	Melhoria ou ampliação da divulgação dos riscos de barragens
3	Scopus e WoS	Fontes, W. C. et al. Mortars for laying and coating produced with iron ore tailings from tailing dams. <b>Construction and Building Materials</b> , v. 112, p. 988-995, 2016.	Gerenciamento de rejeitos de mineração
4	Scopus e WoS	Ahmari, S.; Parameswaran, K.; Zhang, L. Alkali activation of copper mine tailings and low-calcium flash-furnace copper smelter slag. <b>Journal of materials in civil engineering</b> , v. 27, n. 6, p. 04014193, 2015.	Aproveitamento de resíduos da indústria de mineração e implementação de práticas da economia circular
5	WoS	Kinnunen, P. H. M.; Kaksonen, A. H. Towards circular economy in mining: Opportunities and bottlenecks for tailings valorization. <b>Journal of Cleaner Production</b> , v. 228, p. 153-160, 2019.	Aproveitamento de resíduos da indústria de mineração e implementação de práticas da economia circular
6	WoS	Salman, S.; Gook, J. Assessment of molybdenum mine tailings as filler in cement mortar. <b>Journal of Building Engineering</b> , v. 31, n. 9, p. 101-322, 2020.	Gerenciamento de rejeitos de mineração
7	WoS	Obenaus-Emler, R.; Falah, M.; Illikainen, M. Assessment of mine tailings as precursors for alkali-activated materials for on-site applications. <b>Construction and Building Materials</b> , v. 246, p. 118470, 2020.	Gerenciamento de rejeitos de mineração
8	Scopus e WoS	Bag, S. et al. Big data analytics as an operational excellence approach to enhance sustainable supply chain performance. <b>Resources, conservation and recycling</b> , v. 153, p. 104559, 2020.	Desempenho duradouro e sustentável da mineração e sua cadeia de suprimentos.
9	Scopus e WoS	Luthra, S.; Garg, D.; Haleem, A. An analysis of interactions among critical success factors to implement green supply chain management towards sustainability: An Indian perspective. <b>Resources Policy</b> , v. 46, p. 37-50, 2015.	Implementação da Gestão da Cadeia de Suprimentos Verde
10	Scopus e WoS	Kusi-Sarpong, S.; Sarkis, J.; Wang, X. Assessing green supply chain practices in the Ghanaian mining industry: A framework and evaluation. <b>International Journal of Production Economics</b> , v. 181, p. 325-341, 2016.	Implementação da Gestão da Cadeia de Suprimentos Verde
11	Scopus e WoS	Muduli, K. K. et al. Environmental management and the “soft side” of organisations: Discovering the most relevant behavioural factors in green supply chains. <b>Business Strategy and the Environment</b> , v. 29, n. 4, p. 1647-1665, 2020.	Implementação da Gestão da Cadeia de Suprimentos Verde

12	WoS	Mathiyazhagan, K. et al. Application of analytical hierarchy process to evaluate pressures to implement green supply chain management. <b>Journal of Cleaner Production</b> , v. 107, p. 229-236, 2015.	Implementação da Gestão da Cadeia de Suprimentos Verde
13	Scopus e WoS	Valenta, R. K. et al. Re-thinking complex orebodies: Consequences for the future world supply of copper. <b>Journal of Cleaner Production</b> , v. 220, p. 816-826, 2019.	Desempenho duradouro e sustentável da mineração e sua cadeia de suprimentos.
14	Scopus	Mancini, L.; SALA, S. Social impact assessment in the mining sector: Review and comparison of indicators frameworks. <b>Resources Policy</b> , v. 57, p. 98-111, 2018.	Melhoria das condições de trabalho e aplicação dos Direitos humanos
15	Scopus e WoS	Zhang, A. et al. Understanding the social licence to operate of mining at the national scale: a comparative study of Australia, China and Chile. <b>Journal of Cleaner Production</b> , v. 108, p. 1063-1072, 2015.	Desenvolvimento econômico e social das comunidades anfitriãs
16	Scopus e WoS	Kemp, D.; Worden, S.; Owen, J. R. Differentiated social risk: Rebound dynamics and sustainability performance in mining. <b>Resources Policy</b> , v. 50, p. 19-26, 2016.	Desenvolvimento econômico e social das comunidades anfitriãs
17	Scopus e WoS	Mohsin, M. et al. Mining industry impact on environmental sustainability, economic growth, social interaction, and public health: an application of semi-quantitative mathematical approach. <b>Processes</b> , v. 9, n. 6, p. 972, 2021.	Redução da poluição atmosférica Redução de emissão de gases efeito estufa GEE
18	Scopus	Andrews, N. Challenges of corporate social responsibility (CSR) in domestic settings: An exploration of mining regulation vis-à-vis CSR in Ghana. <b>Resources Policy</b> , v. 47, p. 9-17, 2016.	Desenvolvimento econômico e social das comunidades anfitriãs
19	Scopus e WoS	Manowska, A.; Osadnik, K. T.; Wyganowska, M. Economic and social aspects of restructuring Polish coal mining: Focusing on Poland and the EU. <b>Resources policy</b> , v. 52, p. 192-200, 2017.	Redução da poluição atmosférica Redução de emissão de gases efeito estufa GEE Otimização do consumo de energia e redução de consumo de recursos energéticos não renováveis
20	WoS	Jijelava, D.; Vanclay, F. Legitimacy, credibility and trust as the key components of a social licence to operate: An analysis of BP's projects in Georgia. <b>Journal of Cleaner Production</b> , v. 140, p. 1077-1086, 2017.	Desenvolvimento econômico e social das comunidades anfitriãs
21	WoS	Mercer-Mapstone, L. et al. Company-community dialogue builds relationships, fairness, and trust leading to social acceptance of Australian mining developments. <b>Journal of cleaner production</b> , v. 184, p. 671-677, 2018.	Desenvolvimento econômico e social das comunidades anfitriãs
22	Scopus	Taggart, R. K. et al. Trends in the rare earth element content of US-based coal combustion fly ashes. <b>Environmental science &amp; technology</b> , v. 50, n. 11, p. 5919-5926, 2016.	Gerenciamento de rejeitos de mineração
23	Scopus	Calvo, G. et al. Decreasing ore grades in global metallic mining: a theoretical issue or a global reality?. <b>Resources</b> , v. 5, n. 4, p. 36, 2016.	Otimização do consumo de energia e redução de consumo de recursos energéticos não renováveis

24	Scopus e WoS	Bao, Q. et al. The preparation of a novel hydrogel based on crosslinked polymers for suppressing coal dusts. <b>Journal of Cleaner Production</b> , v. 249, p. 119343, 2020.	Redução da poluição atmosférica
25	Scopus e WoS	Lei, K.; Pan, H.; Lin, C. A landscape approach towards ecological restoration and sustainable development of mining areas. <b>Ecological Engineering</b> , v. 90, p. 320-325, 2016.	Recuperação de áreas degradadas e áreas pós-mineração - Utilização de uma estratégia paisagística e tecnologia "natural" na restauração ecológica de minas.
26	Scopus e WoS	Shao, L.; Yu, X.; Feng, C. Evaluating the eco-efficiency of China's industrial sectors: A two-stage network data envelopment analysis. <b>Journal of Environmental Management</b> , v. 247, p. 551-560, 2019.	Redução da poluição atmosférica Redução de emissão de gases efeito estufa GEE Otimização do consumo de energia e redução de consumo de recursos energéticos não renováveis
27	Scopus	Zhu, X.; Chen, Y.; Feng, C. Green total factor productivity of China's mining and quarrying industry: a global data envelopment analysis. <b>Resources Policy</b> , v. 57, p. 1-9, 2018.	Redução da poluição atmosférica Redução de emissão de gases efeito estufa GEE Otimização do consumo de energia e redução de consumo de recursos energéticos não renováveis
28	Scopus e WoS	Zhou, Y. et al. Investigating interior driving factors and cross-industrial linkages of carbon emission efficiency in China's construction industry: Based on Super-SBM DEA and GVAR model. <b>Journal of Cleaner Production</b> , v. 241, p. 118322, 2019.	Redução de emissão de gases efeito estufa GEE
29	Scopus e WoS	Azimidard, A.; Moosavirad, S. H.; Ariafar, S. Selecting sustainable supplier countries for Iran's steel industry at three levels by using AHP and TOPSIS methods. <b>Resources Policy</b> , v. 57, p. 30-44, 2018.	Desenvolvimento de um Programa de avaliação de fornecedores incluindo critérios de sustentabilidade e certificação ISO 14000
30	Scopus e WoS	Wei, J. et al. Driving forces analysis of energy-related carbon dioxide (CO <sub>2</sub> ) emissions in Beijing: an input-output structural decomposition analysis. <b>Journal of Cleaner Production</b> , v. 163, p. 58-68, 2017.	Redução de emissão de gases efeito estufa GEE
31	Scopus e WoS	Monteiro, N. B. R.; Da Silva, E. A.; Neto, J. M. M. Sustainable development goals in mining. <b>Journal of Cleaner Production</b> , v. 228, p. 509-520, 2019.	Aumentar a diversidade, Inclusão e equidade de gênero Desenvolvimento econômico e social das comunidades anfitriãs Recuperação de áreas degradadas e áreas pós-mineração - Utilização de uma estratégia paisagística e tecnologia "natural" na restauração ecológica de minas.
32	Scopus e WoS	Passuello, A. et al. Evaluation of the potential improvement in the environmental footprint of geopolymers using waste-derived activators. <b>Journal of Cleaner Production</b> , v. 166, p. 680-689, 2017.	Redução da contaminação de água, solo e ar
33	Scopus	Shen, L.; Muduli, K.; Barve, A. Developing a sustainable development framework in the context of mining industries: AHP approach. <b>Resources Policy</b> , v. 46, p. 15-26, 2015.	Implementação da Gestão da Cadeia de Suprimentos Verde

34	Scopus e WoS	Chen, Y. et al. A spatial assessment framework for evaluating flood risk under extreme climates. <b>Science of the Total Environment</b> , v. 538, p. 512-523, 2015.	Redução de riscos de inundações na mina e nas comunidades anfitriãs
35	Scopus	Aitken, D. et al. Water scarcity and the impact of the mining and agricultural sectors in Chile. <b>Sustainability</b> , v. 8, n. 2, p. 128, 2016.	Redução do consumo de água doce nova
36	Scopus e WoS	Taha, Y. et al. Reciclagem de resíduos de minas de carvão para recuperação de carvão e produção de tijolos ecológicos. <b>Engenharia de Minerais</b> , v. 107, p. 123-138, 2017.	Redução de emissão de gases efeito estufa GEE Aproveitamento de resíduos da indústria de mineração e implementação de práticas da economia circular
37	Scopus	Saguru, C.; Ndlovu, S.; Moropeng, D. A review of recent studies into hydrometallurgical methods for recovering PGMs from used catalytic converters. <b>Hydrometallurgy</b> , v. 182, p. 44-56, 2018.	Aproveitamento de resíduos da indústria de mineração e implementação de práticas da economia circular
38	Scopus e WoS	Izydorczyk, G. et al. Potential environmental pollution from copper metallurgy and methods of management. <b>Environmental Research</b> , v. 197, p. 111050, 2021.	Redução da contaminação de água, solo e ar
39	Scopus	Deswanto, R. B.; Siregar, S. V. The associations between environmental disclosures with financial performance, environmental performance, and firm value. <b>Social responsibility journal</b> , v. 14, n. 1, p. 180-193, 2018.	Melhoria ou ampliação da divulgação ambiental corporativa na indústria de mineração
40	Scopus e WoS	Tost, M. et al. The state of environmental sustainability considerations in mining. <b>Journal of cleaner production</b> , v. 182, p. 969-977, 2018.	Redução da contaminação de água, solo e ar
41	Scopus	Lee, K. Does size matter? Evaluating corporate environmental disclosure in the Australian mining and metal industry: A combined approach of quantity and quality measurement. <b>Business Strategy and the Environment</b> , v. 26, n. 2, p. 209-223, 2017.	Melhoria ou ampliação da divulgação ambiental corporativa na indústria de mineração
42	Scopus e WoS	Jiskani, I. M. et al. Green and climate-smart mining: A framework to analyze open-pit mines for cleaner mineral production. <b>Resources Policy</b> , v. 71, p. 102007, 2021.	Redução da contaminação de água, solo e ar; Recuperação de áreas degradadas e áreas pós-mineração - Utilização de uma estratégia paisagística e tecnologia "natural" na restauração ecológica de minas; Aproveitamento de resíduos da indústria de mineração e implementação de práticas da economia circular; Otimização do consumo de energia e redução de consumo de recursos energéticos não renováveis
43	Scopus	Li, S. et al. Optimizing ecological security pattern in the coal resource-based city: A case study in Shuozhou City, China. <b>Ecological Indicators</b> , v. 130, p. 108026, 2021.	Implementação da Gestão da Cadeia de Suprimentos Verde

44	Scopus e WoS	Liu, L. et al. Co-disposal of magnesium slag and high-calcium fly ash as cementitious materials in backfill. <b>Journal of Cleaner Production</b> , v. 279, p. 123684, 2021.	Aproveitamento de resíduos da indústria de mineração e implementação de práticas da economia circular
45	Scopus	Jia, P.; Diabat, A.; Mathiyazhagan, K. Analyzing the SSCM practices in the mining and mineral industry by ISM approach. <b>Resources Policy</b> , v. 46, p. 76-85, 2015.	Desenvolvimento de um Programa de avaliação de fornecedores incluindo critérios de sustentabilidade e certificação ISO 14000
46	Scopus	Kivinen, S. Sustainable post-mining land use: are closed metal mines abandoned or re-used space?. <b>Sustainability</b> , v. 9, n. 10, p. 1705, 2017.	Recuperação de áreas degradadas e áreas pós-mineração - Utilização de uma estratégia paisagística e tecnologia "natural" na restauração ecológica de minas.
47	Scopus	Mahmood, M.; Orazalin, N. Green governance and sustainability reporting in Kazakhstan's oil, gas, and mining sector: Evidence from a former USSR emerging economy. <b>Journal of cleaner Production</b> , v. 164, p. 389-397, 2017.	Melhoria ou ampliação da divulgação ambiental corporativa na indústria de mineração
48	Scopus e WoS	Gupta, P. et al. An integrated AHP-DEA multi-objective optimization model for sustainable transportation in mining industry. <b>Resources Policy</b> , v. 74, p. 101180, 2021.	Otimização do transporte de insumos, matérias-primas, produtos e pessoas ao redor da indústria de mineração Redução de emissão de gases efeito estufa GEE
49	Scopus	Chen, R.; Lin, Y.; Tseng, M. Multicriteria analysis of sustainable development indicators in the construction minerals industry in China. <b>Resources Policy</b> , v. 46, p. 123-133, 2015.	Aproveitamento de resíduos da indústria de mineração e implementação de práticas da economia circular Redução da contaminação de água, solo e ar
50	Scopus e WoS	Qi, C.; Chen, Q.; Kim, S. S. Integrated and intelligent design framework for cemented paste backfill: A combination of robust machine learning modelling and multi-objective optimization. <b>Minerals Engineering</b> , v. 155, p. 106422, 2020.	Gerenciamento de rejeitos de mineração
51	Scopus e WoS	Northey, S. A. et al. Sustainable water management and improved corporate reporting in mining. <b>Water Resources and Industry</b> , v. 21, p. 100104, 2019.	Redução do consumo de água doce nova
52	Scopus e WoS	Ranängen, H.; Lindman, Å. A path towards sustainability for the Nordic mining industry. <b>Journal of Cleaner Production</b> , v. 151, p. 43-52, 2017.	Melhoria das condições de trabalho e aplicação dos Direitos humanos
53	Scopus e WoS	Degraeuwe, B. et al. Impact of passenger car NOX emissions on urban NO2 pollution—Scenario analysis for 8 European cities. <b>Atmospheric environment</b> , v. 171, p. 330-337, 2017.	Redução da emissão de NOX e NO2
54	WoS	Rehman Khan, S. A.; YU, Z. Assessing the eco-environmental performance: an PLS-SEM approach with practice-based view. <b>International Journal of Logistics Research and Applications</b> , v. 24, n. 3, p. 303-321, 2021.	Implementação da Gestão da Cadeia de Suprimentos Verde

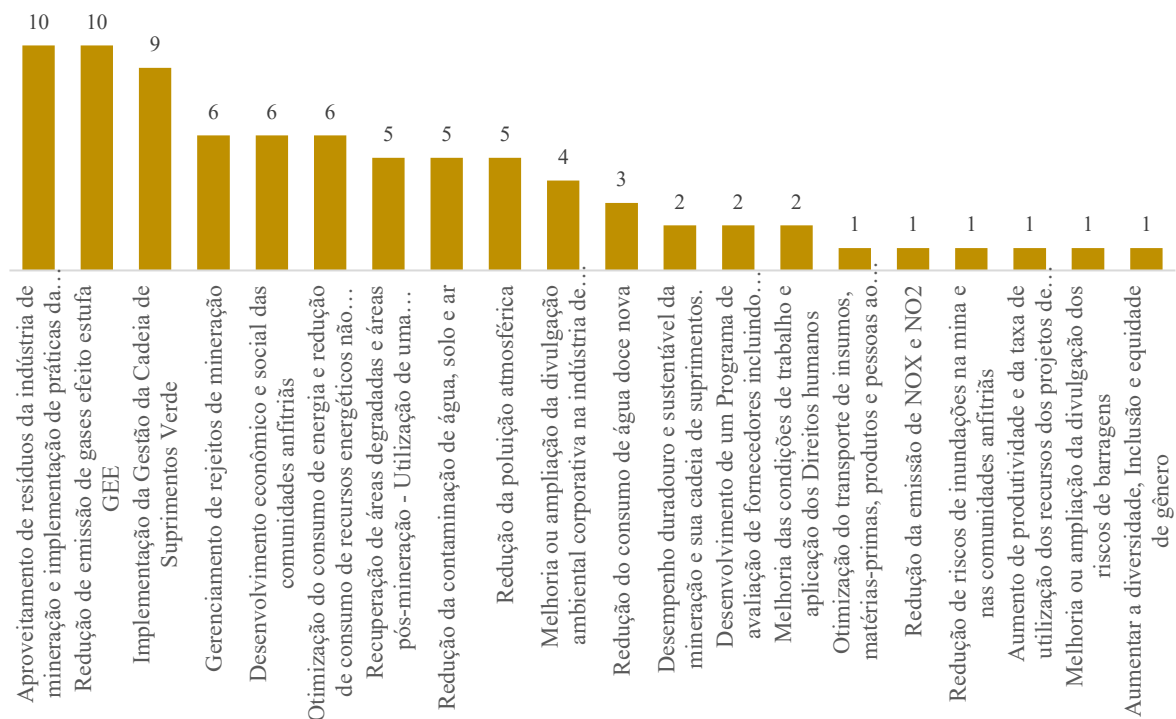
55	WoS	Bai, C.; Kusi-Sarpong, S.; Sarkis, J. An implementation path for green information technology systems in the Ghanaian mining industry. <b>Journal of Cleaner Production</b> , v. 164, p. 1105-1123, 2017.	Implementação da Gestão da Cadeia de Suprimentos Verde
56	WoS	Upadhyay, A. et al. Exploring barriers and drivers to the implementation of circular economy practices in the mining industry. <b>Resources Policy</b> , v. 72, p. 102037, 2021.	Aproveitamento de resíduos da indústria de mineração e implementação de práticas da economia circular
57	WoS	Yu, C. et al. Improving resource utilization efficiency in China's mineral resource-based cities: A case study of Chengde, Hebei province. <b>Resources, Conservation and Recycling</b> , v. 94, p. 1-10, 2015.	Aumento de produtividade e da taxa de utilização dos recursos dos projetos de mineração
58	WoS	Sitorus, F.; Brito-Parada, P. R. A multiple criteria decision-making method to weight the sustainability criteria of renewable energy technologies under uncertainty. <b>Renewable and Sustainable Energy Reviews</b> , v. 127, p. 109891, 2020.	Otimização do consumo de energia e redução de consumo de recursos energéticos não renováveis
59	WoS	Sueyoshi, T.; Goto, M. Environmental assessment on coal-fired power plants in US north-east region by DEA non-radial measurement. <b>Energy Economics</b> , v. 50, p. 125-139, 2015.	Redução de emissão de gases efeito estufa GEE
60	WoS	Zhou, Y. et al. Evaluation index system of green surface mining in China. <b>Mining, Metallurgy &amp; Exploration</b> , v. 37, p. 1093-1103, 2020.	Recuperação de áreas degradadas e áreas pós-mineração - Utilização de uma estratégia paisagística e tecnologia "natural" na restauração ecológica de minas.
61	WoS	Jiskani, I. M. et al. An integrated fuzzy decision support system for analyzing challenges and pathways to promote green and climate smart mining. <b>Expert Systems with Applications</b> , v. 188, p. 116062, 2022.	Aproveitamento de resíduos da indústria de mineração e implementação de práticas da economia circular Redução de emissão de gases efeito estufa GEE Implementação da Gestão da Cadeia de Suprimentos Verde
62	WoS	Liu, J. et al. Evaluating the sustainability impact of consolidation policy in China's coal mining industry: a data envelopment analysis. <b>Journal of Cleaner Production</b> , v. 112, p. 2969-2976, 2016.	Redução do consumo de água doce nova Aproveitamento de resíduos da indústria de mineração e implementação de práticas da economia circular
63	WoS	Adler, R. et al. United Nations Decade on Biodiversity: A study of the reporting practices of the Australian mining industry. <b>Accounting, Auditing &amp; Accountability Journal</b> , v. 30, n. 8, p. 1711-1745, 2017.	Melhoria ou ampliação da divulgação ambiental corporativa na indústria de mineração

Fonte: Elaboração própria (2025)

Cerca de 10 artigos trouxeram mais de uma iniciativa em seu conteúdo. As iniciativas mais mencionadas são: “Aproveitamento de resíduos da indústria de mineração e implementação de práticas da economia circular”, “Implementação da Gestão da Cadeia de Suprimentos Verde” e “Redução de emissão de gases efeito estufa GEE”, como pode ser visto

na Figura 16. Kinnunen e Kaksonen (2019) são alguns dos pesquisadores que escreveram sobre aproveitamento de resíduos e economia circular. Sua pesquisa concluiu que a valorização de rejeitos na indústria de mineração ainda está em sua infância, mas se espera que a situação mude no longo prazo. A transformação de uma economia linear para uma circular requer o enfrentamento dos desafios e a demonstração de possíveis soluções. Atualmente, o conhecimento sobre o conteúdo e as quantidades de rejeitos é limitado. O desenvolvimento tecnológico tem o potencial de transformar materiais de menor qualidade em uma fonte de matéria-prima e tornar toda a matéria-prima valiosa. Segundo Kinnunen e Kaksonen (2019), há um claro potencial de negócios para a recuperação de metais de resíduos de mineração no futuro e barreiras precisam ser identificadas para acelerar a transformação.

Figura 16: Frequência de iniciativas mapeadas nos artigos



Fonte: Elaboração própria (2025)

Para exemplificar a preocupação com a emissão e gases efeito estufa, como o CO<sub>2</sub>, Wei *et al.* (2017) pesquisaram sobre emissões CO<sub>2</sub> na China. Wei *et al.* (2017) identificaram que as indústrias de mineração de metais e não metais, de saneamento básico (energia elétrica, gás e

água) e a construção civil causaram a maioria das emissões de CO<sub>2</sub> entre 2000 e 2010. Embora a mineração, em números absolutos, não esteja no topo desta lista, todos os setores precisam aumentar os esforços para corrigir a situação, ou seja, esforçar-se para desenvolver setores de processos produtivos limpos, diversificados e mais tecnológicos, que reduzam as emissões de CO<sub>2</sub>. Além disso, o governo central da China deve tomar medidas administrativas essenciais para otimizar a estrutura e ajustar a escala econômica.

Um assunto também muito explorado nos artigos é a Gestão da cadeia de Suprimentos verde (GCSV) na mineração. Luthra *et al.* (2015) mapearam 26 Fatores Críticos de Sucesso (FCS) para implementar a GCSV em direção à sustentabilidade da indústria de mineração indiana. O fator que mais impulsiona a implementação da GCSV identificado foi a “Escassez de Recursos Naturais”. Este fator está aumentando as práticas socialmente responsáveis para preservar o meio ambiente dentro das organizações. Os fatores que mais se aperfeiçoam a partir da implementação da GCSV são “Imagem da marca”, “Competitividade da empresa”, e “Benefícios econômicos”. Luthra *et al.* (2015) concluem que a economia é a motivação básica para qualquer indústria ou organização. Toda organização quer gerar mais lucro, mas esta perspectiva isolada pode levar a bons resultados no curto prazo, enquanto um equilíbrio adequado entre as perspectivas econômica, social e ambiental pode ser a chave do sucesso no longo prazo e no desenvolvimento sustentável.

No lado oposto da lista, as iniciativas de menor representatividade corresponde a “Aumentar a diversidade, Inclusão e equidade de gênero”, “Melhoria ou ampliação da divulgação dos riscos de barragens”, “Aumento de produtividade e da taxa de utilização dos recursos dos projetos de mineração”, “Redução de riscos de inundações na mina e nas comunidades anfitriãs”, Redução da emissão de NO<sub>x</sub> e NO<sub>2</sub> e “Otimização do transporte de insumos, matérias-primas, produtos e pessoas ao redor da indústria de mineração”.

Ainda que com menor representatividade, as temáticas mencionadas no parágrafo anterior têm sua importância quando o assunto é sustentabilidade na mineração. Chen *et al.* (2015) trouxeram à luz no seu artigo o grande desafio e o risco crescente de inundações causadas por eventos de chuvas intensas nos últimos anos nas minas de carvão australianas. Ainda que a inundação possa ser um risco físico mais típico das minas da Austrália, outros riscos físicos como movimentação de terra, incêndios, entre outros, podem ser comuns, porém ainda pouco pesquisados. Degraeuwe *et al.* (2017) pesquisaram sobre a frequente exposição da população europeia a concentrações de NO<sub>2</sub> que excedem os padrões de qualidade do ar estabelecidos. Carros a diesel foram identificados como uma das principais fontes desse

problema, por esta razão o artigo traz a necessidade de medidas voltadas para veículos pesados, bem como para os setores de manufatura, energia e mineração, a fim de reduzir a poluição do ar urbano. Em linha com este assunto, Gupta *et al.* (2021) pesquisaram opções de transporte sustentável que levasse à proteção ambiental, velocidade máxima de entrega, custo mínimo de transporte e segurança de tráfego aprimorada na Índia, temática com relação direta com emissão de gás de efeito estufa.

A iniciativa “Aumento de produtividade e da taxa de utilização dos recursos dos projetos de mineração” nasceu em função da pesquisa de Yu *et al.* (2015), que apresentaram a séria escassez de recursos minerais que a China está enfrentando. Os resultados da pesquisa mostram que, em comparação com outras cidades baseadas em recursos na China, a eficiência de utilização de recursos de Chengde, a segunda maior base industrial de vanádio-titânio na China, é baixa, sugerindo que tanto a mineração quanto a indústria de manufatura precisam ser fortalecidas. Outro fortalecimento necessário, identificado por Owen *et al.* (2020) é o estabelecimento e compartilhamento de conhecimento diverso sobre o risco de desastres em barragens de rejeitos. Owen *et al.* (2020) defendem que para as comunidades que residem nas imediações de projetos de barragem, o “direito de saber” deve ser interpretado como uma extensão de um pacote mais amplo de direitos que abrangem a proteção de meios de subsistência, propriedade e liberdade de danos.

Finalmente, elucidando a existência da iniciativa de aumento da diversidade, Inclusão e equidade de gênero na mineração, Monteiro *et al.* (2019) estudaram o nível de execução dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, os ODS, na mineração. Os autores constataram que as indústrias visitadas por eles contribuem para a geração de emprego e renda na região onde estão instaladas (ODS 1, 2 e 8), bem como promovem melhorias à comunidade quanto à infraestrutura do local (ODS 9). No entanto, há deficiências como a baixa incidência de mulheres na força de trabalho (ODS 5). Este artigo traz temas além da diversidade, o desenvolvimento econômico e social das comunidades anfitriãs e a recuperação de áreas degradadas e áreas pós-mineração.

#### 4.1.2 Transformação digital

Nesta segunda entrega, foram estudados 28 artigos filtrados das bases de dados *Scopus* e *WoS* relacionados à transformação digital na indústria de mineração. Dos 28, 11 artigos vieram exclusivamente da *Scopus*, 2 da *WoS* e 15 foram comuns nas duas bases. Com a leitura

dos artigos, foi possível mapear as principais soluções tecnológicas digitais que estão sendo aplicadas no setor de estudo. O Quadro 8 apresenta a lista de artigos associadas às soluções mapeadas.

Quadro 8: Lista de soluções tecnológicas digitais obtidas a partir da RSL

#	Base	Referência	Iniciativas
1	Scopus e WoS	Barnewold, L.; Lottermoser, B.G. Identification of digital technologies and digitalisation trends in the mining industry. <b>International journal of mining science and technology</b> , v. 30, n. 6, p. 747-757, 2020.	Automação Big data (construção de bases de dados e análise) Internet das Coisas (IoT) Robótica Dados em tempo real Aprendizado de Máquina Inteligência Artificial (IA) Drone Impressão 3D Controle de Processo avançado Mídia Social
2	Scopus e WoS	Laayati, O.; Bouzi, M.; Chebak, A. Smart energy management system: design of a monitoring and peak load forecasting system for an experimental open-pit mine. <b>Applied System Innovation</b> , v. 5, n. 1, p. 18, 2022.	Sistema inteligente de gerenciamento de energia Aprendizado de Máquina Internet das Coisas (IoT) Inteligência Artificial (IA)
3	Scopus e WoS	Nwaila, G. T. et al. The minerals industry in the era of digital transition: An energy-efficient and environmentally conscious approach. <b>Resources Policy</b> , v. 78, p. 102851, 2022.	Tecnologia de quebra de rochas nonex Big data (construção de bases de dados e análise) Inteligência Artificial (IA) Aprendizado de Máquina Treinamento baseado em simulação e gamificação Centro de Operações remotas
4	Scopus e WoS	Onifade, M. et al. Challenges and applications of digital technology in the mineral industry. <b>Resources Policy</b> , v. 85, p. 103978, 2023.	Internet das Coisas (IoT) Computação e tecnologia em nuvem Sensores e plataformas digitais Big data (construção de bases de dados e análise) Inteligência Artificial (IA) Tecnologia de quebra de rochas nonex Dados em tempo real Etiquetas de identificação por radiofrequência (RFID) Robótica Redes LTE Automação Drone Centro de Operações remotas
5	Scopus	Guerroum, M. et al. Machine learning technics for remaining useful life prediction using diagnosis data: a case study of a jaw crusher. <b>Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.</b> , v. 12, n. 10, p. 122-135, 2022.	Sensores e plataformas digitais Big data (construção de bases de dados e análise) Dados em tempo real Aprendizado de Máquina

6	Scopus e WoS	Xu, Y. et al. Does digital transformation foster corporate social responsibility? Evidence from Chinese mining industry. <b>Journal of environmental management</b> , v. 344, p. 118646, 2023.	Big data (construção de bases de dados e análise) Blockchain Inteligência Artificial (IA) Computação e tecnologia em nuvem
7	Scopus	Vavenkov, M. V. et al. VR/AR technologies and staff training for mining industry. <b>Gornye nauki i tekhnologii= Mining Science and Technology (Russia)</b> , v. 7, n. 2, p. 180-187, 2022.	Realidade Virtual e/ou Aumentada Treinamento baseado em simulação e gamificação
8	Scopus e WoS	Ulewicz, R.; Krstić, B.; Ingaldi, M. Mining Industry 4.0--Opportunities and Barriers. <b>Acta Montanistica Slovaca</b> , v. 27, n. 2, 2022.	Automação Internet das Coisas (IoT) Robótica Big data (construção de bases de dados e análise) Sistema Cyberfísico Computação e tecnologia em nuvem Inteligência Artificial (IA) Realidade Virtual e/ou Aumentada Segurança cibernética Holografia Modelagem e simulações Centro de Operações remotas Gêmeo Digital
9	Scopus e WoS	Chipangamate, N. S. et al. Integration of stakeholder engagement practices in pursuit of social licence to operate in a modernising mining industry. <b>Resources Policy</b> , v. 85, p. 103851, 2023.	Segurança cibernética
10	Scopus	Shinkevich, A. I.; Vodolazhskaya, E. L.; Baygildin, D. R. Management of a sustainable development of the oil and gas sector in the context of digitalization. 2020.	Treinamento baseado em simulação e gamificação
11	Scopus e WoS	Issatayeva, F. M. et al. Fuel and energy complex of Kazakhstan: Geological and economic assessment of enterprises in the context of digital transformation. <b>Energies</b> , v. 16, n. 16, p. 6002, 2023.	Big data (construção de bases de dados e análise) Modelagem e simulações Realidade Virtual e/ou Aumentada Internet das Coisas (IoT) Sensores e plataformas digitais Gêmeo digital Sistemas de planejamento de recursos empresariais (ERP) Automação Sistemas de gerenciamento de produção (MES)
12	Scopus e WoS	Abdellah, W. R. et al. The key challenges towards the effective implementation of digital transformation in the mining industry. <b>Geosystem Engineering</b> , v. 25, n. 1-2, p. 44-52, 2022.	Internet das Coisas (IoT) Segurança cibernética
13	Scopus e WoS	Aubakirova, G.; Rudko, G.; Isataeva, F. Assessment of metallurgical enterprises' activities in Kazakhstan in the context of international trends. <b>Economic Annals-XXI</b> , v. 187, 2021.	Automação Big data (construção de bases de dados e análise)
14	Scopus	Zaman, Q.U. et al. Reviewing energy efficiency and environmental consciousness in the minerals industry Amidst digital transition: A	Treinamento baseado em simulação e gamificação Amostragem online Planejamento e análise online

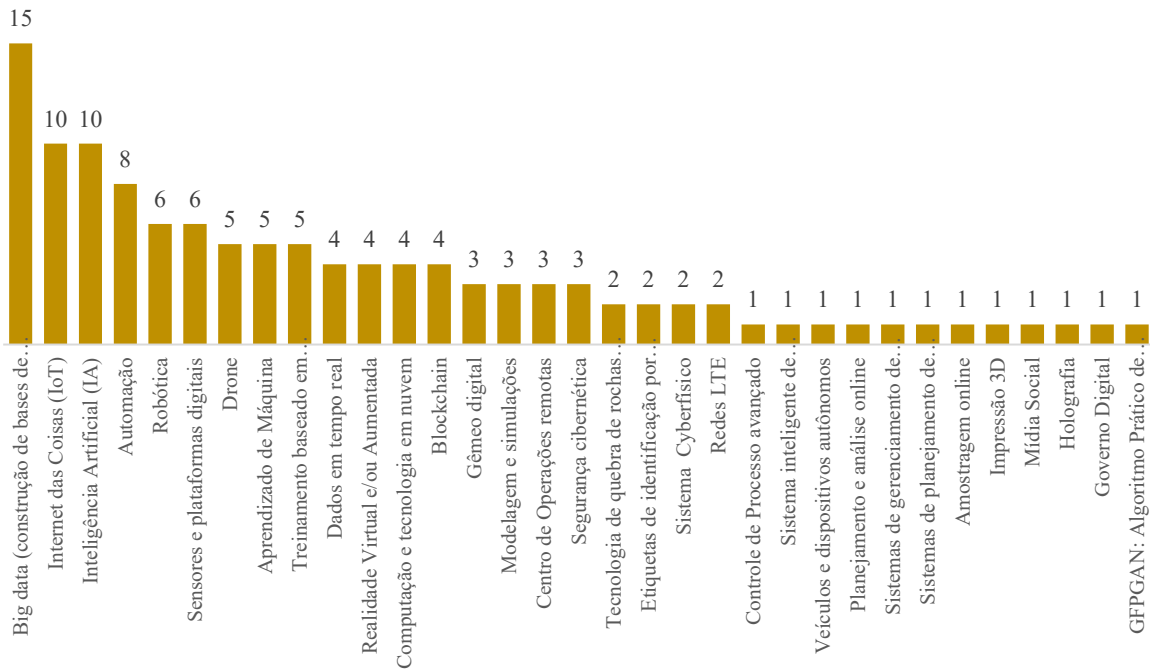
		comprehensive review. <b>Resources Policy</b> , v. 91, p. 104851, 2024.	Big data (construção de bases de dados e análise) Internet das Coisas (IoT) Inteligência Artificial (IA) Aprendizado de Máquina Sensores e plataformas digitais Etiquetas de identificação por radiofrequência (RFID) Drones Automação
15	Scopus e WoS	Zhou, Y. Natural resources and green economic growth: A pathway to innovation and digital transformation in the mining industry. <b>Resources Policy</b> , v. 90, p. 104667, 2024.	Big data (construção de bases de dados e análise) Internet das Coisas (IoT) Inteligência Artificial (IA) Blockchain
16	Scopus	Jia, X. et al. The induced effects of carbon emissions for China's industry digital transformation. <b>Sustainability</b> , v. 15, n. 16, p. 12170, 2023.	Sensores e plataformas digitais
17	Scopus e WoS	Van Hau, N. et al. Digital Transformation in Mining Sector in Vietnam. <b>Inżynieria Mineralna</b> , n. 2, p. 21-30, 2022.	Automação Big data (construção de bases de dados e análise)
18	Scopus e WoS	Philo, K. G.; Webber-Youngman, R. C. W. A critical investigation into identifying key focus areas for the implementation of blockchain applications in the mining industry. <b>Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy</b> , v. 124, n. 6, p. 319-330, 2024.	Blockchain
19	Scopus	Linghu, J.; Guo, C. Digital government: The new player in improving mining companies' environmental performance?. <b>Resources Policy</b> , v. 93, p. 105094, 2024.	Governo Digital
20	Scopus e WoS	Akhtar, S. et al. Green mining in China: Fintech's contribution to enhancing innovation performance aimed at sustainable and digital transformation in the mining sector. <b>Resources Policy</b> , v. 92, p. 104968, 2024.	Internet das Coisas (IoT) Inteligência Artificial (IA) Big data (construção de bases de dados e análise) Automação Blockchain
21	Scopus e WoS	Soydan, H.; Düzgün, H. Ş.; Brune, J. A. Novel Job Similarity Index for Career Transition in the Mining Industry. <b>Mining, Metallurgy &amp; Exploration</b> , p. 1-22, 2024.	Automação Robótica Drone Realidade Virtual e/ou Aumentada Gêmeo digital Treinamento baseado em simulação e gamificação
22	Scopus	Lafquih, H.; Krimi, I.; Elhaq, S. L. Digging into Mining 4.0: Applying Systems Engineering to a Digital Spare Parts Management System. <b>IEEE Engineering Management Review</b> , 2023.	Sensores e plataformas digitais Modelagem e simulações
23	Scopus	Cahill, S. Resilient transformation in the mining industry. <b>AusIMM Bulletin</b> , (7), p. 1-3, 2021	Big data (construção de bases de dados e análise)
24	Scopus	Taufik, A. M. et al. Organizational dynamics in shared it leadership at coal mining industry: a case study. <b>JOIV: International Journal on Informatics Visualization</b> , v. 5, n. 3, p. 231-235, 2021.	Big data (construção de bases de dados e análise)

25	Scopus	Moccia, R.; Sojka, R. Industrial IoT Networking. <b>Water and Wastes Digest</b> , v. 59, n 1, 2020.	Redes LTE Internet das Coisas (IoT)
26	Scopus	Theng, C. In an age of digital disruption, how one company is staying ahead of the game. <b>Mining Engineering</b> , 71(8), pp. 48–49, 2019.	Dados em tempo real Veículos e dispositivos autônomos Robótica Sensores e plataformas digitais
27	WoS	Zulu, M. S.; Pretorius, M. W.; Van Der Lingen, E. Strategic competitiveness of the South African mining industry in the age of the Fourth Industrial Revolution. <b>South African Journal of Industrial Engineering</b> , v. 32, n. 3, p. 185-200, 2021.	Sistema Cyberfísico Internet das Coisas (IoT) Robótica Big data (construção de bases de dados e análise) Computação e tecnologia em nuvem Inteligência Artificial (IA)
28	WoS	Zhang, X.; Feng, J. A Novel Blind Restoration Method for Miner Face Images Based on Improved GFP-GAN Model. <b>IEEE Access</b> , 2024.	GFPGAN: Algoritmo Prático de Restauração Facial

Fonte: Elaboração própria (2025)

Foram mapeadas 33 soluções tecnológicas digitais após a leitura dos artigos. No Quadro 8, cabe notar que a maioria dos artigos apresentam mais de uma solução tecnológica. Barnewold e Lottermoser (2020), assim como Onifade *et al.* (2023) e Ulewicz *et al.* (2022), trazem em suas pesquisas, no setor da mineração, as principais tecnologias digitais aplicadas, as que são tendências, os desafios e as barreiras para maiores desenvolvimentos. Estes três artigos mencionam em média 12 tipos de soluções digitais cada um. As soluções digitais mapeadas mais mencionadas estão apresentadas na Figura 17.

Figura 17: Frequência de soluções digitais mapeadas nos artigos



Fonte: Elaboração própria (2025)

Zhang e Feng (2024), os únicos da lista de artigos a pesquisarem sobre GFP-GAN na mineração, desenvolveram uma nova e aprimorada abordagem GFP-GAN, adaptada especificamente para a restauração cega de imagens faciais de mineradores. Este desenvolvimento, segundo os autores, é um meio importante de transformação digital: as imagens restauradas de rosto de mineradores podem melhorar a segurança, produção, eficiência de atendimento e nível de gestão de pessoas.

Também de forma única, Linghu e Guo (2024) pesquisaram sobre Governo digital. Segundo os autores melhorar o desempenho ambiental é um caminho crítico para a transformação das empresas de mineração. Uma análise mais aprofundada revela que o Governo digital melhora o desempenho ambiental, social e de governança (ESG) das empresas de mineração, mas afeta insignificamente o desempenho social. No geral, os resultados da pesquisa fornecem evidências em nível micro dos benefícios ambientais da reforma do Governo e oferecem uma nova perspectiva para explorar os impulsionadores do desempenho ambiental das empresas de mineração.

A solução holografia é citada na pesquisa de Ulewicz *et al.* (2022) como um dos seis pontos que definiria a mina do futuro. Como nenhum outro artigo mencionou tal solução tecnológica, pode-se afirmar que há grandes probabilidades de esta solução não representar o futuro na mineração. Assim como a holografia, mídia social e impressão 3D só foram

mencionadas uma vez por Barnewold e Lottermoser (2020). Tais autores identificaram que mídia social está principalmente relacionada com relações públicas, enquanto impressão 3D pode ser empregada para produzir peças de reposição e componentes personalizados, o que por sua vez pode reduzir o custo de armazenamento, produção e prazos de entrega.

A coleta e análise de volumes significativos de dados de processo é o ponto crucial da transformação digital. As operações de mineração, em particular, capturam, armazenam e interpretam grandes volumes de dados de equipamentos e plantas em toda a cadeia de valor. Entender esses dados é um passo fundamental à medida que a indústria olha para o futuro e para a mudança prevista em direção à Autonomia Industrial (CAHILL, 2021). É por esta razão que *big data* e automação estão no topo da lista dos mais mencionados nos artigos. O Conselho Mineral da África do Sul definiu a 4ª Revolução Industrial na mineração como desenvolvimentos tecnológicos que integram sistemas ciberfísicos e a Internet das Coisas, *big data*, computação em nuvem, robótica e sistemas baseados em inteligência artificial (ZULU *et al.*, 2022). A partir desta definição, pode-se perceber o quanto tais soluções digitais caminham juntas no desenvolvimento integrado na mineração.

Outra solução é o blockchain. Comumente utilizada no setor financeiro e de serviços, Philo e Webber-Youngman (2024) e Akhtar *et al.* (2024) pesquisaram sobre os benefícios da implementação da solução na mineração. Segundo Akhtar *et al.* (2024), a implementação da tecnologia blockchain, por exemplo, permitiu um gerenciamento da cadeia de suprimentos mais transparente e eficiente, garantindo rastreabilidade e fornecimento ético de minerais. Para Philo e Webber-Youngman (2024), alguns dos principais benefícios da aplicação do blockchain são melhorias na transparência de dados, eficiências no rastreamento e localização de dados e conformidade automatizada. As áreas focais para integração de blockchain dentro da indústria de mineração giram principalmente em torno de unidades de negócios, processos e atividades que exigem uma perspectiva abrangente, rastreamento meticolosos de dados e automação de processos simplificada. Como tal, a indústria de mineração pode aproveitar o potencial transformador do blockchain implementando-o estrategicamente nessas áreas-chave, revolucionando, em última análise, a maneira como as empresas de mineração conduzem e gerenciam suas operações.

Em resumo, a partir das leituras foi possível mapear as soluções de transformação digital e as iniciativas de sustentabilidade baseado na revisão sistemática de literatura realizada. O resultado a seguir se trata da validação das duas listas em campo com especialistas das duas temáticas na mineradora em estudo.

## 4.2 Lista de iniciativas e soluções validadas

A validação contribui para a credibilidade, a perspectiva prática, a identificação de vieses e o aprofundamento da análise. Por estas razões, foram apresentadas a especialistas da empresa do setor da mineração estudada, as listas obtidas na etapa 4.1. O objetivo neste momento é confirmar se as iniciativas de sustentabilidade e as soluções de transformação digital mapeadas através da revisão de literatura se aplicam na prática às mineradoras.

### 4.2.1 Lista de iniciativas de Sustentabilidade validada por especialistas

Nas entrevistas com as especialistas da temática de sustentabilidade, foram sugeridas alterações de nomes, divisões e/ou unificações de iniciativas e ampliação de escopo. O Quadro 9 apresenta a lista de iniciativas mapeadas na etapa de revisão de literatura, a lista validada pelas especialistas e a explicação das alterações sugeridas e acatadas.

Quadro 9: Lista de iniciativas de Sustentabilidade validadas pelas especialistas

Nº	Lista de iniciativas de derivadas da RSL	Nº	Lista de iniciativa de sustentabilidade validada por especialista	Alterações sugeridas e realizadas
1	Gerenciamento de rejeitos de mineração	1	Gerenciamento de rejeitos e estéreis de mineração	Inclusão dos estéreis de mineração, que incluem rochas, solo e outros materiais que não contêm os minerais valiosos minerados.
2	Aproveitamento de resíduos da indústria de mineração e implementação de práticas da economia circular	2	Aproveitamento de resíduos da indústria de mineração e implementação de práticas de economia circular	Validada
3	Desempenho duradouro e sustentável da mineração e sua cadeia de suprimentos.	3	Desenvolvimento de um Programa de avaliação de fornecedores incluindo critérios de sustentabilidade como descarbonização e certificação ISO 14000. “Gestão de Cadeia de Suprimentos Verde”	Unificação das três iniciativas mapeadas na etapa anterior por se tratar de desenvolvimento de fornecedores e da cadeia de suprimentos, visando medir critérios incluídos na cadeia de suprimentos verde, tal como a descarbonização.
4	Implementação da Gestão da Cadeia de Suprimentos Verde			
5	Desenvolvimento de um Programa de avaliação de fornecedores incluindo critérios de sustentabilidade e certificação ISO 14000			
6	Melhoria das condições de trabalho e aplicação dos Direitos humanos	4	Melhoria das condições de trabalho (ambiente seguro, bem-estar, salário digno etc.)	Foi sugerida a divisão para focar em melhoria das condições de trabalho e na garantia da

		5	Devida Diligência em Direitos Humanos (Garante a aplicação, manutenção e não violação dos direitos humanos)	aplicação, manutenção e não violação dos direitos humanos, devido à relevância das duas temáticas.
7	Aumentar a diversidade, Inclusão e equidade de gênero	6	Aumentar a diversidade, Inclusão e equidade dos grupos minorizados (Mulheres, Raça, Pessoas com deficiência, LGBTQIA+, etc.)	Sugeriram a ampliação dos grupos minorizados, ou seja, considerar não somente o gênero como a raça, pessoas com deficiência, LGBTQIA+, etc. Chamou a atenção que na literatura existe um maior foco para o grupo de gênero, mas na prática os demais grupos foram lembrados e solicitada a ampliação.
8	Desenvolvimento econômico e social das comunidades anfitriãs	7	Desenvolvimento econômico e social de territórios mineradores e das comunidades anfitriãs.	Esta iniciativa foca no desenvolvimento econômico e social, ou seja, geração de impostos, parcerias, investimento social, conservação dos recursos de valor cultural local, etc. Foi sugerida a ampliação da abrangência para as áreas diretamente afetadas (ADA), que são as comunidades anfitriãs, assim como as áreas de influência direta (AID), que são os territórios mineradores.
9	Recuperação de áreas degradadas e áreas pós-mineração - Utilização de uma estratégia paisagística e tecnologia "natural" na restauração ecológica de minas.	8	Planejamento e execução do processo de fechamento de mina e definição de uso futuro	Foi sugerida a troca para planejamento e execução do processo de fechamento de mina, por ser um assunto muito importante e ainda pouco priorizado na mineração.
10	Otimização do transporte de insumos, matérias-primas, produtos e pessoas ao redor da indústria de mineração	9	Mobilização urbana - Alternativas para redução de tráfego e transporte sustentável na região mineradora	Como a grande maioria das mineradoras estão próximas ou em centros urbanos, a iniciativa está mais focada na busca e no desenvolvimento de alternativas para redução de risco de acidentes, da emissão de CO2 e melhoria da qualidade de vida local.
11	Redução da poluição atmosférica	10	Redução da poluição atmosférica (Particulado, Pó preto, NOx, NO2, SOx, etc)	Sugerido o agrupamento das duas iniciativas e às vezes tratadas como gestão atmosférica e climática.
13	Redução da emissão de NOX e NO2			
12	Redução de emissão de gases efeito estufa GEE	11	Mudanças climáticas - Descarbonização e redução de emissão de gases efeito estufa (GEE)	Sugerida a inclusão do termo de mudanças climáticas, para englobar o risco de eventos climáticos extremos (seca extrema, chuvas excessivas).
14	Otimização do consumo de energia e redução de consumo de recursos energéticos não renováveis	12	Otimização do consumo de energia e redução de consumo de recursos energéticos não renováveis	Validada

15	Redução de riscos de inundações na mina e nas comunidades anfitriãs	13	Redução de riscos físicos: Inundações, incêndios e movimentação de terras na mina e nas comunidades anfitriãs	Foi sugerida a ampliação dos tipos de riscos, chamados de físicos, em virtude do aumento de demandas recebidas de investidores e bancos relacionadas principalmente aos riscos de incêndios nas atividades industriais. Nesta mesma linha, inundações, movimentações de terras, entre outros também encaixam nos riscos físicos.
16	Redução do consumo de água doce nova	14	Redução do consumo de água doce e nova	Validada
17	Redução da contaminação de água, solo e ar	15	Redução da contaminação de água, solo e ar	Validada
18	Aumento de produtividade e da taxa de utilização dos recursos dos projetos de mineração	16	Aumento da eficiência operacional e melhoria da atratividade do mineral no mercado	Foi sugerida que além da visão interna de aumento de produtividade, utilização, disponibilidade e eficiência visando menor custo de produção, fosse incluído o aumento da atratividade do mineral no mercado, com o fim de aumentar o número de clientes e valor pago pelo produto.
19	Melhoria ou ampliação da divulgação ambiental corporativa na indústria de mineração	17	Transparência da performance de sustentabilidade e diálogo efetivo com as partes interessadas	Foi sugerida substituir as duas iniciativas para tratar de algo mais amplo que é a transparência e o diálogo com as partes interessadas. Expandindo não só para riscos de barragens como também para respostas rápidas a eventos inesperados e adversos. Além da transparência e o diálogo englobarem a divulgação ambiental e de riscos, eles permitem melhorias no relacionamento com as comunidades. Outro ponto levantado foi a preocupação com o greenwashing ou a aparente de divulgação de mais marketing que resultados efetivos, mais um motivo para a alteração das iniciativas.
20	Melhoria ou ampliação da divulgação dos riscos de barragens			

Fonte: Elaboração própria (2025)

De acordo com a participante 1, os temas das iniciativas mapeados na etapa de revisão de literatura estão muito alinhados a um mapeamento realizado por uma consultoria, externa à empresa, dos temas que as principais empresas de mineração no Brasil, como Nexa, CBA, Arcelor Mittal Brasil, Samarco, CSN, Anglo American, Kinross, Gerdau, BHP, Vale, Usiminas entre outras estão priorizando quanto a iniciativas de sustentabilidade. Além destas empresas, os temas também vão ao encontro dos principais assuntos priorizados nas revistas de referência

em sustentabilidade: SASB *Sustainability Accounting Standard for Metals & Mining* e SASB *Sustainability Accounting Standard for Iron & Steel producers* e nos Ratings: MSCI *ESG Industry Materiality Map - Diversified Metals & Mining* e S&P *Yearbook 2023 - Metals & Mining*. Outras fontes de comparação com as iniciativas mapeadas na revisão de literatura também trazidas pela participante 1 foram a Carta Compromisso do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), os Princípios da Mineração do ICMM, o TSM - *Towards Sustainable Mining* - e até mesmo os ODS. De acordo com a participante, os nomes podem ser um pouco diferentes, mas a essência é a mesma.

Da lista enviada inicialmente, não foi retirada nenhuma das iniciativas, foram sugeridos e realizados: ajustes de textos; adequações para não ser tão genérico; unificação entre iniciativas, principalmente quanto a fornecedores e cadeia de suprimentos; adequações de nomes como Devida Diligência em Direitos Humanos – DDDH para tratar de Direitos Humanos; ampliação dos grupos de gênero tratados na iniciativa; diferenciação entre desenvolvimento socioeconômico e relacionamento com as comunidades, incluindo os termos transparências e diálogo; ponderada a importância da gestão social contida dentro de cada iniciativa; enfatizada a necessidade do planejamento e execução do processo de fechamento de minas, reconversão econômica de território, recuperação de áreas degradadas e usos futuros; mencionado o conceito de transição energética dentro da temática da otimização do consumo de energia; e reforçada a preocupação com a transparência da divulgação de relatórios e combate ao *greenwashing*.

Finalizadas as entrevistas, a lista foi consolidada em 17 iniciativas de sustentabilidade obtidas inicialmente a partir da revisão de literatura feita na etapa 4.1.1 e adequada para os termos e visões das especialistas da empresa em estudo.

#### 4.2.2 *Lista de soluções tecnológicas de transformação digital validada*

Seguindo os mesmos passos do Tópico 4.2.1, foram apresentadas aos especialistas de tecnologia e automação da mineradora em estudo 33 soluções de tecnologia de transformação digital retiradas dos artigos lidos na revisão de literatura. Da lista de 33, algumas foram eliminadas, outras foram divididas e algumas denominações foram ajustadas. O Quadro 10 apresenta a lista validada e os comentários e sugestões realizados pelos participantes 3 e 4.

Quadro 10: Lista de soluções de Transformação Digital validadas pelos especialistas

Nº	Lista de Soluções de Transformação Digital derivadas da RSL	Nº	Lista de soluções de Transformação Digital validadas pelos especialistas	Alterações sugeridas e realizadas e comentários
1	Automação	1	Automação	Amplamente utilizada na mineração, desde controle de equipamentos até máquinas autônomas. É um escopo que se desdobra em muitos tópicos de transformação digital.
2	<i>Big data</i> (construção de bases de dados e análise)	2	Big data	<i>Big data</i> é fundamental para permitir coletar, armazenar e processar uma enorme quantidade de dados de diversas fontes. Isso permite gerar informações para tomada de decisões utilizando <i>analytics</i> ou técnicas avançadas de <i>data science</i> , por exemplo. Foi sugerido manter somente o termo <i>Big data</i> pela amplitude do seu conceito.
3	Internet das Coisas (IoT)	3	Internet das Coisas (IoT)	IoT ou ainda IIoT. Sensores IoT são importantes para monitoramento de equipamentos, condições ambientais, rastreamento, entre muitos outros fatores
4	Robótica	4	Robótica	A indústria de mineração não está na vanguarda da robótica, mas pode ter diferentes aplicações.
5	Dados em tempo real	5	Dados em tempo real	Dados em tempo real permitem monitorar a condição de ativos, identificar desvios de produção ou das condições ambientais, proporcionando uma tomada de decisão mais ágil.
6	Impressão 3D	6	Impressão 3D	Pode ser utilizada para peças de reposição, otimização de estoque ou ainda construção de cenários (maquetes) geológicas. Entretanto, não se tem visto ampla utilização na mineração.
7	Inteligência Artificial (IA)	7	Inteligência Artificial (IA)	Muito importante como ferramenta para geração de informações, apoio a tomada de decisão, principalmente sobre o volume de dados que é gerado atualmente.
8	Drone	8	Drone	Muito utilizado na Mineração, desde vigilância, medições e inspeção de campo, até mapeamento geológico.
9	Aprendizado de Máquina	9	Aprendizado de Máquina	Importante também como ferramenta para geração de informações e apoio a tomada de decisão.
10	Mídia Social	10	Mídia Social	Importante para fortalecimento da marca. Não foi vista como fundamental e específico para a Mineração, mas importante para comunicação e interação das mineradoras com terceiros.
11	Realidade Virtual e/ou Aumentada	11	Realidade Virtual e/ou Aumentada	Pode ser utilizada para treinamentos (simulações) e para aumento de produtividade.
12	Controle de Processo avançado	12	Controle de Processo avançado	Ferramenta para controle automático de processo, reduzindo a necessidade de intervenção humana, proporcionando

				tratativa ágil de desvios em processos e redução de variabilidades.
13	Sistema inteligente de gerenciamento de energia	13	Sistema inteligente de gerenciamento de energia	Importante para otimizar o consumo energético.
14	Gêmeo digital	14	Gêmeo digital	Permite simular cenários sem risco para a operação real.
15	Tecnologia de quebra de rochas Nonex			Eliminada, por não ser transformação digital, por se tratar de tecnologia para quebra de rochas por pressão.
16	Computação e tecnologia em nuvem	15	Computação e tecnologia em nuvem	Tecnologia em nuvem é muito utilizada para reduzir custos através do compartilhamento de infraestrutura de TI, permitindo ampliar os recursos disponíveis.
17	Blockchain	16	Blockchain	Pode ser utilizado em cenários que exigem confiabilidade e rastreabilidade de informações. Comum em setores como o financeiro. Pouco utilizado na mineração, mas se aplicaria para certificados ambientais e de qualidade armazenados em blockchain.
18	Holografia			Eliminada. Poderia ser utilizada para projeção de estruturas geológicas, mas não foi evidenciado pelos especialistas.
19	Modelagem e simulações	17	Modelagem	Foi sugerido o desmembramento das soluções, pois o modelamento é importante para determinar onde estão os recursos a serem explorados na mineração.
		18	Sistemas de Simulações	Assim como as simulações são importantes para otimizar produção.
20	Veículos e dispositivos autônomos	19	Veículos e dispositivos autônomos	Caminhões, perfuratrizes e plantas autônomas são realidades na mineração.
21	Planejamento e análise online	20	Planejamento e análise online	Permite tomada de decisão orientada a informações e de forma ágil.
22	Centro de Operações Remotas	21	Centro de Operações Remotas	Centro de operação remoto é muito mais que tecnologia digital, e já é uma realidade na mineração.
23	Sistemas de gerenciamento de produção (MES)	22	Sistemas de gerenciamento de produção (MES)	Fundamental para gestão da rotina das operações. Integra dados, monitora em tempo real, gerencia qualidade, permite rastreamento e rastreabilidade de informações. Usualmente principal gerador de dados da mineração.
24	Sistemas de planejamento de recursos empresariais (ERP)	23	Sistemas de planejamento de recursos empresariais (ERP)	Integra processos, incluindo <i>backoffice</i> , gestão de estoques, planejamento da produção, atendimento a requisitos legais, entre outros.
25	Sensores e plataformas digitais	24	Sensores	Foi recomendado dividir por serem temas diferentes que se integram. Sensores estão muito ligados a IoT.
		25	Plataformas digitais	Plataformas digitais são sistemas online que conectam diferentes usuários, produtos ou serviços, facilitando a interação e a troca de informações (representa uma variedade imensa de soluções)

26	Etiquetas de identificação por radiofrequência (RFID)	26	Etiquetas de identificação por radiofrequência (RFID)	São muito utilizadas para controle de acesso e podem ser utilizadas para outras finalidades como rastreamento de pessoas e materiais.
27	Cybersecurity	27	Cybersecurity	Fundamental para segurança do negócio. Um dos temas mais importantes da atualidade que é a segurança dos dados e dos serviços digitais. Um ataque pode causar paralização de atividades, acesso a dados sensíveis ou mesmo acidentes pois há sistemas que controlam equipamentos.
28	Amostragem online	28	Amostragem online	Importante para ter informações de qualidade em tempo real, permitindo uma tomada rápida de decisão.
29	Treinamento baseado em simulação e gamificação	29	Treinamento baseado em simulação	Se mistura com realidade virtual, que também é muito utilizada para simulação.
		30	Gamificação	Gamificação é um conceito que transcende a tecnologia digital, mas ela pode ser utilizada como ferramenta de apoio
30	Governo Digital			Eliminada. Não apresenta um foco específico com a mineração
31	Sistema Cyberfísico	31	Sistema Cyberfísico	Relevante para monitoramento preditivo de ativos, por exemplo, composto por diversas camadas de soluções que vão desde sensores até <i>datalake</i> para geração de informações.
32	Redes LTE	32	Redes LTE	Habilitador de uma gama de soluções. Sistemas de gestão de mina modernos com GPS de alta precisão demandam uma rede de banda larga, assim como equipamentos autônomos ou controlados remotamente.
33	GFPGAN: Algoritmo Prático de Restauração Facial			Eliminada, pois os especialistas não encontraram uma evidência de aplicação na mineração

Fonte: Elaboração própria (2025)

As duas entrevistas estiveram alinhadas quanto aos seus pareceres e opiniões. A lista mapeada e validada foi encerrada com 32 soluções tecnológicas de Transformação Digital totalmente aplicáveis à mineração. Conforme é possível ver nos comentários feitos pelos especialistas, certas soluções como automação, inteligência artificial, *big data*, drones e aprendizados de máquina são de uso amplo na indústria de mineração, enquanto impressão 3D, *blockchain*, Mídia Digital e Robótica não são de uso constante e geral na Mineração, mas são aplicáveis.

Outra observação importante é que a maioria dos comentários e exemplos de aplicações citados correspondem a usos com fins de aumentar a produtividade, reduzir custos, manter e melhorar a saúde dos ativos, tomar decisões com mais agilidade e precisão e, em resumo, ter processos mais eficientes. A transformação digital, sob a perspectiva da sustentabilidade, principalmente nos quesitos sociais, mas não só nesta temática, ainda é pouco vinculada como

um impulsionador na jornada da mineração sustentável. No tópico a seguir será investigado, através da Grade de Repertório, em que medida tais soluções impulsionam as iniciativas validadas na etapa anterior.

### **4.3 Grade de repertório**

Foi aplicada a técnica de grade de repertório a cinco profissionais da área de automação, inovação e otimização da empresa em estudo. Os elementos da grade consistem nas iniciativas de sustentabilidade e os construtos nas soluções de transformação digital. A avaliação realizada obedeceu a escala *Likert* de 5 pontos, os profissionais avaliaram de 1 a 5 o quanto cada solução impulsiona cada iniciativa, sendo nota 1 a que menos impulsiona e 5 a que mais impulsiona. Depois de realizada a avaliação de forma individualizada, as cinco respostas foram consolidadas. A consolidação se deu pelo somatório das cinco notas e a ordenação do maior para o menor verticalmente e horizontalmente. O resultado obtido pode ser visto na Figura 18.

As 10 soluções de Transformação Digital que mais impulsionam as iniciativas de sustentabilidade são: Inteligência Artificial (IA); Plataformas digitais; Dados em tempo real; Automação; Sistemas de Simulações; Sensores; *Big data*; Aprendizado de Máquina; Modelagem; e Redes LTE. Observa-se também que impressão 3D, Etiquetas de identificação por radiofrequência (RFID), Blockchain, Drone, Sistema inteligente de gerenciamento de energia e robótica são as soluções que menos agregam valor, em geral, sob a perspectiva de sustentabilidade.

Figura 18: Grade de repertório consolidada

Nº	Iniciativas de Sustentabilidade	Soluções de Transformação Digital aplicadas à Mineração																		Consolidado
		Aumento da eficiência operacional e melhoria da atratividade do mineral no mercado	Otimização do consumo de energia e redução de consumo de recursos energéticos não renováveis	Melhoria das condições de trabalho (ambiente seguro, bem estar, salário digno, etc)	Mudanças climáticas - Descarbonização e redução de emissão de gases efeito estufa (GEE)	Redução de riscos físicos: Inundações, incêndios e movimentação de terras na mina e nas comunidades anfitriãs	Redução da poluição atmosférica (Particulado, Pó preto, NOx, NO2, SOx, etc)	Redução do consumo de água doce e nova	Redução da contaminação de água, solo e ar	Gerenciamento de rejeitos e estéreis de mineração	Mobilização urbana - Alternativas para redução de tráfego e transporte sustentável na região mineradora	Aproveitamento de resíduos da indústria de mineração e implementação de práticas de economia circular	Planejamento e execução do processo de fechamento de mina e definição de uso futuro	Desenvolvimento econômico e social de territórios mineradores e das comunidades anfitriãs.	Devida Diligência em Direitos Humanos (Garante a aplicação, manutenção e não violação dos direitos humanos)	Transparência da performance de sustentabilidade e diálogo efetivo com as partes interessadas	Aumentar a diversidade, Inclusão e equidade dos grupos minorizados (Mulheres, Raça, Pessoas com deficiência, LGBTQIA+, etc)	Desenvolvimento de um Programa de avaliação de fornecedores incluindo critérios de sustentabilidade como descarbonização e certificação ISO 14000. "Gestão de Cadeia de Suprimentos Verde"		
1	Inteligência Artificial (IA)	23	24	20	23	22	23	22	21	18	21	15	15	14	12	11	13	15	312	
2	Plataformas digitais	19	20	18	19	19	19	20	19	18	19	20	18	16	15	18	17	16	310	
3	Dados em tempo real	24	25	16	25	24	25	25	24	21	22	16	12	10	10	14	7	9	309	
4	Automação	24	24	24	22	23	23	23	23	22	15	21	14	12	11	6	10	8	305	
5	Sistemas de Simulações	23	24	16	23	23	22	23	22	19	22	19	17	15	9	9	7	7	300	
6	Sensores	22	24	17	24	24	24	22	24	19	18	16	15	9	10	10	8	10	296	
7	Big data	23	23	18	19	20	19	20	17	17	20	15	17	16	9	11	10	17	291	
8	Aprendizado de Máquina	24	25	17	23	20	23	23	21	18	21	14	14	11	8	9	8	11	290	
9	Modelagem	23	24	13	24	21	23	21	21	18	19	18	17	12	8	6	8	8	284	
10	Redes LTE	24	21	15	16	24	16	20	20	20	19	17	12	11	8	9	9	8	269	

Figura 18: Grade de repertório consolidada - Continuação.

Nº	Iniciativas de Sustentabilidade Soluções de Transformação Digital aplicadas à Mineração	Iniciativas de Sustentabilidade																		Consolidado
		Aumento da eficiência operacional e melhoria da atratividade do mineral no mercado	Otimização do consumo de energia e redução de consumo de recursos energéticos não renováveis	Melhoria das condições de trabalho (ambiente seguro, bem estar, salário digno, etc)	Mudanças climáticas - Descarbonização e redução de emissão de gases efeito estufa (GEE)	Redução de riscos físicos: Inundações, incêndios e movimentação de terras na mina e nas comunidades anfitriãs	Redução da poluição atmosférica (Particulado, Pó preto, NOx, NO2, SOx, etc)	Redução do consumo de água doce e nova	Redução da contaminação de água, solo e ar	Gerenciamento de rejeitos e estéréis de mineração	Mobilização urbana - Alternativas para redução de tráfego e transporte sustentável na região mineradora	Aproveitamento de resíduos da indústria de mineração e implementação de práticas de economia circular	Planejamento e execução do processo de fechamento de mina e definição de uso futuro	Desenvolvimento econômico e social de territórios mineradores e das comunidades anfitriãs.	Devida Diligência em Direitos Humanos (Garante a aplicação, manutenção e não violação dos direitos humanos)	Transparência da performance de sustentabilidade e diálogo efetivo com as partes interessadas	Aumentar a diversidade, Inclusão e equidade dos grupos minorizados (Mulheres, Raça, Pessoas com deficiência, LGBTQIA+, etc)	Desenvolvimento de um Programa de avaliação de fornecedores incluindo critérios de sustentabilidade como descarbonização e certificação ISO 14000. "Gestão de Cadeia de Suprimentos Verde"		
11	Gêmeo digital	23	24	17	23	18	22	22	18	16	16	12	15	8	8	6	7	5	260	
12	Planejamento e análise online	20	17	15	18	16	18	19	17	21	15	15	18	12	7	11	9	10	258	
13	Internet das Coisas (IoT)	20	21	20	16	22	18	20	20	17	16	13	13	9	9	5	8	6	253	
14	Amostragem online	22	22	16	19	19	21	19	23	20	10	12	9	8	9	7	9	8	253	
15	Controle de Processo avançado	23	23	19	23	14	23	24	24	14	8	12	8	10	8	6	7	5	251	
16	Centro de Operações remotas	22	17	21	17	17	17	17	17	17	13	13	8	11	13	9	10	7	246	
17	Mídia Social	13	11	13	15	15	11	9	11	8	17	14	11	14	16	24	20	19	241	
18	Sistemas Cyber Físico	15	15	23	15	17	15	13	13	13	14	11	13	11	13	10	10	7	228	
19	Computação e tecnologia em nuvem	19	19	10	15	12	15	12	14	15	14	16	12	10	8	13	8	10	222	
20	Sistemas de planejamento de recursos empresariais (ERP)	14	18	12	14	10	13	14	13	18	6	15	18	8	12	15	9	13	222	
21	Sistemas de gerenciamento de produção (MES)	14	16	12	14	11	14	11	11	21	6	17	15	8	11	15	9	13	218	

Figura 18: Grade de repertório consolidada - Continuação.

Nº	Iniciativas de Sustentabilidade	Soluções de Transformação Digital aplicadas à Mineração																	Consolidado
		Aumento da eficiência operacional e melhoria da atratividade do mineral no mercado	Otimização do consumo de energia e redução de consumo de recursos energéticos não renováveis	Melhoria das condições de trabalho (ambiente seguro, bem estar, salário digno, etc)	Mudanças climáticas - Descarbonização e redução de emissão de gases efeito estufa (GEE)	Redução de riscos físicos: Inundações, incêndios e movimentação de terras na mina e nas comunidades anfitriãs	Redução da poluição atmosférica (Particulado, Pó preto, NOx, NO2, SOx, etc)	Redução do consumo de água doce e nova	Redução da contaminação de água, solo e ar	Gerenciamento de rejeitos e estereis de mineração	Mobilização urbana - Alternativas para redução de tráfego e transporte sustentável na região mineradora	Aproveitamento de resíduos da indústria de mineração e implementação de práticas de economia circular	Planejamento e execução do processo de fechamento de mina e definição de uso futuro	Desenvolvimento econômico e social de territórios mineradores e das comunidades anfitriãs.	Devida Diligência em Direitos Humanos (Garante a aplicação, manutenção e não violação dos direitos humanos)	Transparência da performance de sustentabilidade e diálogo efetivo com as partes interessadas	Aumentar a diversidade, Inclusão e equidade dos grupos minorizados (Mulheres, Raça, Pessoas com deficiência, LGBTQIA+, etc)	Desenvolvimento de um Programa de avaliação de fornecedores incluindo critérios de sustentabilidade como descarbonização e certificação ISO 14000. "Gestão de Cadeia de Suprimentos Verde"	
22	Cybersecurity	17	13	19	12	16	12	12	12	13	12	12	8	11	14	14	8	8	213
23	Gamificação	13	10	22	11	12	10	12	10	11	9	16	11	16	14	9	15	12	213
24	Treinamento baseado em simulação	17	14	22	13	17	15	14	12	10	10	8	10	11	12	7	12	8	212
25	Veículos e dispositivos autônomos	16	11	20	14	16	12	8	12	14	17	11	11	8	12	6	8	6	202
26	Realidade Virtual e/ou Aumentada	14	13	21	10	18	11	9	9	13	10	12	13	9	10	9	8	6	195
27	Robótica	16	16	20	15	10	13	10	14	9	10	8	9	9	11	5	12	5	192
28	Sistema inteligente de gerenciamento de energia	19	24	11	15	9	14	18	12	9	7	10	8	9	6	6	6	8	191
29	Drone	11	7	16	9	16	14	8	13	15	16	10	14	8	8	5	5	5	180
30	Blockchain	10	10	8	10	9	9	8	8	10	9	12	9	10	11	12	10	10	165
31	Etiquetas de identificação por radiofrequência (RFID)	10	8	11	7	8	6	5	6	9	10	7	7	8	7	6	6	8	129
32	Impressão 3D	6	7	10	6	6	5	5	5	5	7	8	5	8	6	5	8	5	107
	Consolidado	583	570	532	529	528	525	508	506	488	448	435	396	342	325	308	301	293	

Fonte: Elaboração própria (2025)

As cinco iniciativas de sustentabilidade mais impulsionadas pelas tecnologias digitais, conforme os avaliadores são:

1. Aumento da eficiência operacional e melhoria da atratividade do mineral no mercado;
2. Otimização do consumo de energia e redução de consumo de recursos energéticos não renováveis;
3. Melhoria das condições de trabalho (ambiente seguro, bem-estar, salário digno, etc.);
4. Mudanças climáticas - Descarbonização e redução de emissão de gases efeito estufa (GEE);
5. Redução de riscos físicos: Inundações, incêndios e movimentação de terras na mina e nas comunidades anfitriãs

Ao passo que as iniciativas menos impulsionadas pelas soluções digitais são:

1. Desenvolvimento de um programa de avaliação de fornecedores incluindo critérios de sustentabilidade como descarbonização e certificação ISO 14000. “Gestão de Cadeia de Suprimentos Verde”;
2. Aumentar a diversidade, Inclusão e equidade dos grupos minorizados (mulheres, raça, pessoas com deficiência, LGBTQIA+, etc.);
3. Transparência da performance de sustentabilidade e diálogo efetivo com as partes interessadas;
4. Devida Diligência em Direitos Humanos (Garante a aplicação, manutenção e não violação dos direitos humanos);
5. Desenvolvimento econômico e social de territórios mineradores e das comunidades anfitriãs.

Tal classificação evidencia como questões relacionadas a aumento de eficiência operacional, otimização do consumo energético, descarbonização e redução de riscos físicos são mais impulsionados pela tecnologia que temáticas mais humanas como diversidade, inclusão e equidade, devida diligência em direitos humanos, desenvolvimento econômico e social das comunidades.

Cinco avaliações apresentaram as maiores variações entre as respostas dos participantes, conforme Tabela 5. Esta variação deriva dos diferentes níveis de conhecimento de cada respondente, da atuação deles em relação a cada solução digital e às iniciativas de

sustentabilidade e às suas experiências, que poderia ser reduzida caso houvesse um momento de calibração das notas em uma reunião envolvendo todos.

Tabela 5: Maiores variações entre as notas dos participantes

<b>Solução para Iniciativa</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P4</b>	<b>P5</b>	<b>Variação</b>
Veículos e dispositivos autônomos para Mudanças climáticas - Descarbonização e redução de emissão de gases efeito estufa (GEE)	1	2	1	5	5	3,36
Sistema inteligente de gerenciamento de energia para Mudanças climáticas - Descarbonização e redução de emissão de gases efeito estufa (GEE)	1	3	1	5	5	3,2
Sistemas de gerenciamento de produção (MES) para Transparência da performance de sustentabilidade e diálogo efetivo com as partes interessadas	1	3	1	5	5	3,2
Sistemas de planejamento de recursos empresariais (ERP) para Transparência da performance de sustentabilidade e diálogo efetivo com as partes interessadas	1	3	1	5	5	3,2
Plataformas digitais para Transparência da performance de sustentabilidade e diálogo efetivo com as partes interessadas	2	5	1	5	5	3,04

Fonte: Elaboração própria (2025)

Para evoluir para a etapa de ranqueamento das soluções de tecnologias digitais e sustentabilidade combinadas, foram selecionadas as combinações para as quais todos os participantes deram nota 5 ou somente um deu nota 4, ou seja, somatórias maior ou igual a 24, estes foram os cruzamentos de cor verde da Figura 20. Desta forma, elimina-se a questão da variação entre participantes e consolida-se uma base de 28 combinações, listadas no Quadro 11.

Quadro 11: Soluções digitais combinadas com sustentabilidade priorizadas

<b>Lista Combinada entre solução digital e Sustentabilidade</b>	
1	Inteligência Artificial (IA) para Otimização do consumo de energia e redução de consumo de recursos energéticos não renováveis
2	Dados em tempo real para Aumento da eficiência operacional e melhoria da atratividade da pelota de minério de ferro no mercado
3	Dados em tempo real para Otimização do consumo de energia e redução de consumo de recursos energéticos não renováveis
4	Dados em tempo real para Mudanças climáticas - Descarbonização e redução de emissão de gases efeito estufa (GEE)
5	Dados em tempo real para Redução de riscos físicos: Inundações, incêndios e movimentação de terras na mina e nas comunidades anfitriãs
6	Dados em tempo real para Redução da poluição atmosférica (Particulado, Pó preto, NOx, NO2, SOx, etc)
7	Dados em tempo real para Redução do consumo de água doce e nova
8	Dados em tempo real para Redução da contaminação de água, solo e ar

9	Automação para Aumento da eficiência operacional e melhoria da atratividade da pelota de minério de ferro no mercado
10	Automação para Otimização do consumo de energia e redução de consumo de recursos energéticos não renováveis
11	Automação para Melhoria das condições de trabalho (ambiente seguro, bem-estar, salário digno, etc)
12	Sistemas de Simulações para Otimização do consumo de energia e redução de consumo de recursos energéticos não renováveis
13	Sensores para Otimização do consumo de energia e redução de consumo de recursos energéticos não renováveis
14	Sensores para Mudanças climáticas - Descarbonização e redução de emissão de gases efeito estufa (GEE)
15	Sensores para Redução de riscos físicos: Inundações, incêndios e movimentação de terras na mina e nas comunidades anfitriãs
16	Sensores para Redução da poluição atmosférica (Particulado, Pó preto, NOx, NO2, SOx, etc)
17	Sensores para Redução da contaminação de água, solo e ar
18	Aprendizado de Máquina para Aumento da eficiência operacional e melhoria da atratividade da pelota de minério de ferro no mercado
19	Aprendizado de Máquina para Otimização do consumo de energia e redução de consumo de recursos energéticos não renováveis
20	Modelagem para Otimização do consumo de energia e redução de consumo de recursos energéticos não renováveis
21	Modelagem para Mudanças climáticas - Descarbonização e redução de emissão de gases efeito estufa (GEE)
22	Redes LTE para Aumento da eficiência operacional e melhoria da atratividade da pelota de minério de ferro no mercado
23	Redes LTE para Redução de riscos físicos: Inundações, incêndios e movimentação de terras na mina e nas comunidades anfitriãs
24	Gêmeo digital para Otimização do consumo de energia e redução de consumo de recursos energéticos não renováveis
25	Controle de Processo avançado para Redução do consumo de água doce e nova
26	Controle de Processo avançado para Redução da contaminação de água, solo e ar
27	Mídia Social para Transparência da performance de sustentabilidade e diálogo efetivo com as partes interessadas
28	Sistema inteligente de gerenciamento de energia para Otimização do consumo de energia e redução de consumo de recursos energéticos não renováveis

Fonte: Elaboração própria (2025)

As cores do Quadro 11 separam as soluções digitais empregadas. Nota-se que dados em tempo real e sensores são as tecnologias que mais se repetem. Sob a perspectiva das iniciativas de sustentabilidade, a “Otimização do consumo de energia e redução de consumo de recursos energéticos não renováveis” é a mais impulsionada pelas tecnologias, aparecendo oito vezes nesta lista.

Mídia digital, ainda que não apareça entre as dez principais soluções digitais, torna-se fundamental quando o foco é a transparência da performance de sustentabilidade e diálogo efetivo com as partes interessadas. Da mesma forma aparecem o Controle de Processo Avançado para redução do consumo de água doce e nova e da contaminação de água, solo e ar. Além de gêmeo digital e sistema inteligente de gerenciamento de energia exclusivamente para

otimização do consumo de energia e redução de consumo de recursos energéticos não renováveis. A lista conforme obtida será utilizada na etapa 6, em vista ao ranqueamento das opções.

#### **4.4 Construtos definidos via Técnica de Grade de Repertório**

Para a obtenção dos critérios a serem utilizados na etapa 6 de ranqueamento das alternativas, foi utilizada parte da técnica de grade de repertório para levantamento dos construtos. Nas quatro sessões de análise de tríades realizadas com os participantes 1, 2, 3 e 4 das áreas de sustentabilidade e tecnologia, foram mapeados cerca de 24 construtos. Na análise de tríade para os elementos de tecnologia foram identificados construtos focados na implementação tecnológica, como interoperabilidade (capacidade de interação entre as tecnologias), sistemas para simulações *versus* sistemas reais, amplitude de aplicação, dependência entre tecnologias, entre outras. Tais construtos foram pouco aplicáveis na avaliação das alternativas combinadas entre solução digital e sustentabilidade. Por esta razão, foram priorizados os construtos obtidos nas entrevistas com as especialistas de sustentabilidade. Estes últimos se caracterizavam mais aderentes à avaliação das alternativas combinadas.

Destes construtos, optou-se por selecionar sete de maior coerência devido, principalmente, à saturação nas respostas obtidas nas entrevistas e pela complexidade da comparação em pares pelos outros participantes na etapa do método AHP.

O resultado obtido, apresentado no Quadro 12, explicita critérios de avaliação da capacidade de realização, como os critérios 1 e 2: Capacidades internas, que mede a autonomia e independência para execução; e Capacidade de articulação, que mede a força para influenciar, articular e negociar com o público externo. Os critérios 3, 4, 5 e 6 já estão relacionados com os resultados a serem alcançados com a implementação, ou seja, o impacto no longo prazo, o impacto no controle do aquecimento global, impactos socialmente positivos e responsáveis e a ecoeficiência. O último critério, ética e transparência, avalia o potencial de cada iniciativa em fortalecer o setor da mineração a ser cada vez mais ético e transparente para todas as partes interessadas.

Quadro 12: Construtos obtidos a partir da análise de tríades pelos especialistas

LISTA DE CRITÉRIOS			
#	Critério	Conceito	Regra para avaliação (1-5)
1	Capacidades internas	Avalia a capacidade e autonomia da empresa para executar a iniciativa internamente, requerendo menor participação de agentes externos	Quanto maior a nota mais independe de agentes externos, ou seja, mais se consegue desenvolver internamente a iniciativa
2	Capacidade de articulação externa	Avalia a capacidade de influência, articulação e negociação perante agentes externos	Quanto maior a nota, maior é a capacidade de influência, articulação e negociação com os agentes externos para implementar a iniciativa
3	Impacto no longo prazo	Avalia o potencial da iniciativa em trazer ganhos contínuos de longo prazo para a empresa	Quanto maior a nota maior o potencial da iniciativa em capturar ganhos econômicos, sociais e ambientais
4	Impacto positivo no controle do aquecimento global	Avalia o quanto a iniciativa pode permitir o controle ou até mesmo reduzir a taxa de aquecimento global	Quanto maior a nota maior a influência da iniciativa em evitar e/ou controlar o aumento da taxa de aquecimento global
5	Gestão de impactos sociais positivos	Avalia o quanto a iniciativa favorece as comunidades anfitriãs nas quais as mineradoras estão inseridas	Quanto maior a nota mais a iniciativa impacta positivamente as comunidades anfitriãs onde a mineradora está inserida
6	Ecoeficiência operacional	Avalia a eficiência em seu sentido amplo: Redução do consumo de insumos, redução de desperdícios, aumento de produtividades, tudo que permite maior eficiência e benefícios ambientais	Quanto maior a nota maior a ecoeficiência gerada pela iniciativa
7	Ética e transparência	Avalia o potencial da iniciativa em fortalecer a empresa a ser cada vez mais ética e transparente para todas as partes interessadas	Quanto maior a nota mais a iniciativa permite a empresa ser mais ética e transparente

Fonte: Elaboração própria (2025)

Desta forma, diante do Quadro 12, percebe-se que sete critérios serão considerados como os elementos avaliativos e apresentam uma padronização quanto a direção de preferência de maximização.

#### 4.5 Pesos dos critérios definidos por meio da calculadora AHP

Dos 7 critérios definidos na seção anterior, os três participantes desta etapa fizeram as 21 comparações pareadas derivadas. Os resultados ponderados pelos critérios escolhidos na comparação entre pares de cada participantes e a média entre eles estão apresentados na Tabela 6. A CR dos três participantes foram: 3,6%, 9,5% e 8,2%, respectivamente. Ao final da

comparação completa, calculava-se o índice CR e revisavam-se as notas com o objetivo de melhorar a consistência, chegando a tais resultados.

Tabela 6: Pesos obtidos para os 7 critérios analisados

<b>Crítérios</b>	<b>P10</b>	<b>P11</b>	<b>P12</b>	<b>Média</b>
Capacidades internas	10,10%	3,80%	16,50%	10,13%
Capacidade de articulação externa	4,30%	3,70%	14,60%	7,53%
Impacto no longo prazo	3,60%	12,10%	2,70%	6,13%
Impacto positivo no controle do aquecimento global	12,80%	26,20%	5,30%	14,77%
Gestão de impactos sociais positivos	8,70%	20,30%	15,20%	14,73%
Ecoeficiência operacional	31%	6,70%	11,50%	16,40%
Ética e transparência	29,50%	27,20%	34,20%	30,30%

Fonte: Elaboração própria (2025)

Ao observar o resultado, conforme apresentado na Tabela 6, pode-se afirmar que o critério “ética e transparência” foi unanimemente o de maior importância para os participantes. Os demais critérios foram variando dentro da análise individual de cada um. Na média, “capacidades internas”, “capacidade de articulação externa” e “impacto no longo prazo” foram os de menor peso para os avaliadores, enquanto “impacto no controle do aquecimento global”, “gestão de impactos sociais” e “ecoficiência operacional” são os de importância média e “ética e transparência”, como já mencionado, é o mais destacado dos critérios, sendo quase o dobro do segundo maior.

Pode-se notar que os critérios de menor importância estão mais associados às capacidades, seja ela interna ou de articulação externa, para executar uma iniciativa, e os de maior peso mais associados às consequências da iniciativa, seja para impulsionar a mineradora a ser cada vez mais ética e transparente, ser mais ecoeficiente ou até mais ativa com a sociedade e com as mudanças climáticas. Este resultado faz pensar que o objetivo esperado tem maior importância que as capacidades de alcançá-lo, desde que haja ética e transparência.

#### **4.6 Iniciativas ranqueadas a partir do método ELECTRE III**

Foi realizado o ranqueamento das iniciativas apresentadas no Quadro 11, a partir do método ELECTRE III. O entrevistado qualificou de 1 a 5 os sete critérios apresentados no Quadro 12 para cada iniciativa combinada. Os pesos identificados na etapa 4.5, juntamente com

as qualificações, foram incluídos no software e, através do solver, foram obtidos a matriz de dominância na Tabela 7 e o ranking publicado nas Tabelas 8 e 9.

#### 4.6.1 Matriz de dominância

A matriz de dominância no método ELECTRE III é uma ferramenta essencial para representar as comparações entre alternativas com base nos critérios considerados. Esta matriz mostra quais alternativas são consideradas pelo menos tão boas quanto outras de acordo com as preferências e ponderações dos critérios. Cada célula representa a relação de dominância entre uma alternativa (linha) em relação a outra (coluna). Para cada critério, é verificado se uma alternativa domina outra considerando os pesos e limiares associados. Não foram considerados limiares de indiferença, preferência e veto, somente o peso de cada critério. A matriz de dominância é usada para determinar as alternativas mais fortes e criar um ranking parcial ou completo, além de ajudar a identificar quais alternativas possuem mais força em relação às demais.

Na Tabela 7, pode-se observar que a alternativa  $a_5$ , por exemplo, tem preferência forte sobre 25 alternativas e sobre duas ela é indistinguível, isso quer dizer que quando comparada com as outras alternativas, 92,6% das vezes a alternativa  $a_5$  é superior. De maneira similar, a alternativa  $a_{23}$  tem preferência fraca sobre 26 alternativas, ou seja, em quase 100% das comparações, especificamente 96,3%, a alternativa  $a_{23}$  não foi preferida. As alternativas  $a_5$ ,  $a_8$  e  $a_{17}$  foram as de maiores preferências, enquanto as alternativas  $a_{23}$  e  $a_4$  foram as de preferência mais fracas.

Tabela 7: Matriz de dominância

	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	a <sub>6</sub>	a <sub>7</sub>	a <sub>8</sub>	a <sub>9</sub>	a <sub>10</sub>	a <sub>11</sub>	a <sub>12</sub>	a <sub>13</sub>	a <sub>14</sub>	a <sub>15</sub>	a <sub>16</sub>	a <sub>17</sub>	a <sub>18</sub>	a <sub>19</sub>	a <sub>20</sub>	a <sub>21</sub>	a <sub>22</sub>	a <sub>23</sub>	a <sub>24</sub>	a <sub>25</sub>	a <sub>26</sub>	a <sub>27</sub>	a <sub>28</sub>	
a <sub>1</sub>	-	P-	P-	P+	P-	P-	P-	P-	R	R	P-	P+	P-	R	P-	P-	P-	P+	P+	P-	P+	P-	P+	I	P-	P-	P+	P+	
a <sub>2</sub>	P+	-	I	P+	P-	R	R	P-	P+	P+	R	P+	P-	P+	P-	R	P-	P+	P+	R	P+	R	P+	P+	R	R	P+	P+	
a <sub>3</sub>	P+	I	-	P+	P-	R	R	P-	P+	P+	R	P+	P-	P+	P-	R	P-	P+	P+	R	P+	R	P+	P+	R	R	P+	P+	
a <sub>4</sub>	P-	P-	P-	-	P-	P-	P-	P-	P-	P-	P-	P-	P-	P-	P-	P-	P-	P-	P-	P-	P-	P-	I	P-	P-	P-	P-	P-	
a <sub>5</sub>	P+	P+	P+	P+	-	P+	P+	I	P+	P+	P+	P+	P+	P+	P+	P+	I	P+	P+	P+	P+	P+	P+	P+	P+	P+	P+	P+	
a <sub>6</sub>	P+	R	R	P+	P-	-	R	P-	R	R	P+	P+	R	P+	R	P+	P-	P+	P+	P+	P+	P+	P+	P+	P+	R	R	P+	P+
a <sub>7</sub>	P+	R	R	P+	P-	R	-	P-	R	R	P+	P+	R	R	R	R	P-	P+	P+	R	P+	R	P+	P+	R	R	P+	P+	
a <sub>8</sub>	P+	P+	P+	P+	I	P+	P+	-	P+	P+	P+	P+	P+	P+	P+	P+	I	P+	P+	P+	P+	P+	P+	P+	P+	P+	P+	P+	
a <sub>9</sub>	R	P-	P-	P+	P-	R	R	P-	-	I	R	P+	P-	P+	P-	R	P-	P+	P+	R	P+	R	P+	R	R	R	R	P+	P+
a <sub>10</sub>	R	P-	P-	P+	P-	R	R	P-	I	-	R	P+	P-	P+	P-	R	P-	P+	P+	R	P+	R	P+	R	R	R	R	P+	P+
a <sub>11</sub>	P+	R	R	P+	P-	P-	P-	P-	R	R	-	P+	P-	R	P-	R	P-	P+	P+	R	P+	R	P+	P+	P-	P-	P+	P+	
a <sub>12</sub>	P-	P-	P-	P+	P-	P-	P-	P-	P-	P-	P-	-	P-	P-	P-	P-	P-	I	I	P-	I	P-	P+	P-	P-	P-	P-	I	
a <sub>13</sub>	P+	P+	P+	P+	P-	R	R	P-	P+	P+	P+	P+	-	P+	P+	P+	P-	P+	P+	P+	P+	P+	P+	P+	P+	P+	P+	P+	
a <sub>14</sub>	R	P-	P-	P+	P-	P-	R	P-	P-	P-	R	P+	P-	-	P-	P-	P-	P+	P+	P-	P+	P-	P+	R	P-	P-	R	P+	
a <sub>15</sub>	P+	P+	P+	P+	P-	R	R	P-	P+	P+	P+	P+	P-	P+	-	P+	P-	P+	P+	P+	P+	P+	P+	P+	P+	P+	P+	P+	
a <sub>16</sub>	P+	R	R	P+	P-	P-	R	P-	R	R	R	P+	P-	P+	P-	-	P-	P+	P+	P-	P+	I	P+	P+	P-	P-	P+	P+	
a <sub>17</sub>	P+	P+	P+	P+	I	P+	P+	I	P+	P+	P+	P+	P+	P+	P+	P+	-	P+	P+	P+	P+	P+	P+	P+	P+	P+	P+	P+	
a <sub>18</sub>	P-	P-	P-	P+	P-	P-	P-	P-	P-	P-	P-	I	P-	P-	P-	P-	P-	-	I	P-	I	P-	P+	P-	P-	P-	P-	I	
a <sub>19</sub>	P-	P-	P-	P+	P-	P-	P-	P-	P-	P-	P-	I	P-	P-	P-	P-	P-	I	-	P-	I	P-	P+	P-	P-	P-	P-	I	
a <sub>20</sub>	P+	R	R	P+	P-	P-	R	P-	R	R	R	P+	P-	P+	P-	P+	P-	P+	P+	-	P+	P+	P+	P+	P-	P-	P+	P+	
a <sub>21</sub>	P-	P-	P-	P+	P-	P-	P-	P-	P-	P-	P-	I	P-	P-	P-	P-	P-	I	I	P-	-	P-	P+	P-	P-	P-	P-	I	
a <sub>22</sub>	P+	R	R	P+	P-	P-	R	P-	R	R	R	P+	P-	P+	P-	I	P-	P+	P+	P-	P+	-	P+	P+	P-	P-	P+	P+	
a <sub>23</sub>	P-	P-	P-	I	P-	P-	P-	P-	P-	P-	P-	P-	P-	P-	P-	P-	P-	P-	P-	P-	P-	P-	-	P-	P-	P-	P-	P-	
a <sub>24</sub>	I	P-	P-	P+	P-	P-	P-	P-	R	R	P-	P+	P-	R	P-	P-	P-	P+	P+	P-	P+	P-	P+	-	P-	P-	P+	P+	
a <sub>25</sub>	P+	R	R	P+	P-	R	R	P-	R	R	P+	P+	P-	P+	P-	P+	P-	P+	P+	P+	P+	P+	P+	P+	P+	-	I	P+	P+
a <sub>26</sub>	P+	R	R	P+	P-	R	R	P-	R	R	P+	P+	P-	P+	P-	P+	P-	P+	P+	P+	P+	P+	P+	P+	P+	I	-	P+	P+
a <sub>27</sub>	P-	P-	P-	P+	P-	P-	P-	P-	P-	P-	P-	P+	P-	R	P-	P-	P-	P+	P+	P-	P+	P-	P+	P-	P-	P-	-	P+	
a <sub>28</sub>	P-	P-	P-	P+	P-	P-	P-	P-	P-	P-	P-	I	P-	P-	P-	P-	P-	I	I	P-	I	P-	P+	P-	P-	P-	P-	-	

Fonte: Elaborado a partir do software J-ELECTRE-v3.0 – [github.com/Valdecy](https://github.com/Valdecy) (2025)

#### 4.6.2 Ranking

O ranking no ELECTRE III é gerado a partir de um processo estruturado que utiliza as informações da matriz de sobreclassificação elaborada no tópico anterior, avaliando as relações de dominância entre alternativas com base em múltiplos critérios. Esse método busca criar um ordenamento parcial ou total das alternativas, levando em conta o grau de concordância. No final do processo, tem-se a média das duas ordenações e o ranking final das alternativas através do método ELECTRE III, conforme Tabela 8.

Tabela 8: Ranking das iniciativas pelo ELECTRE III

	<i>Ascend.</i>	<i>Descend.</i>	<i>Average</i>
<b><i>a<sub>5</sub></i></b>	1.0	1.0	<b>1.0</b>
<b><i>a<sub>8</sub></i></b>	1.0	1.0	<b>1.0</b>
<b><i>a<sub>17</sub></i></b>	1.0	1.0	<b>1.0</b>
<b><i>a<sub>13</sub></i></b>	4.0	2.0	<b>3.0</b>
<b><i>a<sub>15</sub></i></b>	4.0	3.0	<b>3.5</b>
<b><i>a<sub>2</sub></i></b>	6.0	4.0	<b>5.0</b>
<b><i>a<sub>3</sub></i></b>	6.0	4.0	<b>5.0</b>
<b><i>a<sub>6</sub></i></b>	3.0	7.0	<b>5.0</b>
<b><i>a<sub>25</sub></i></b>	4.0	6.0	<b>5.0</b>
<b><i>a<sub>26</sub></i></b>	4.0	6.0	<b>5.0</b>
<b><i>a<sub>7</sub></i></b>	2.0	9.0	<b>5.5</b>
<b><i>a<sub>9</sub></i></b>	7.0	5.0	<b>6.0</b>
<b><i>a<sub>10</sub></i></b>	7.0	5.0	<b>6.0</b>
<b><i>a<sub>20</sub></i></b>	5.0	7.0	<b>6.0</b>
<b><i>a<sub>11</sub></i></b>	4.0	9.0	<b>6.5</b>
<b><i>a<sub>16</sub></i></b>	5.0	8.0	<b>6.5</b>
<b><i>a<sub>22</sub></i></b>	5.0	8.0	<b>6.5</b>
<b><i>a<sub>1</sub></i></b>	6.0	9.0	<b>7.5</b>
<b><i>a<sub>24</sub></i></b>	6.0	9.0	<b>7.5</b>
<b><i>a<sub>14</sub></i></b>	8.0	8.0	<b>8.0</b>
<b><i>a<sub>27</sub></i></b>	7.0	9.0	<b>8.0</b>
<b><i>a<sub>12</sub></i></b>	8.0	9.0	<b>8.5</b>
<b><i>a<sub>18</sub></i></b>	8.0	9.0	<b>8.5</b>
<b><i>a<sub>19</sub></i></b>	8.0	9.0	<b>8.5</b>
<b><i>a<sub>21</sub></i></b>	8.0	9.0	<b>8.5</b>
<b><i>a<sub>28</sub></i></b>	8.0	9.0	<b>8.5</b>
<b><i>a<sub>4</sub></i></b>	9.0	9.0	<b>9.0</b>
<b><i>a<sub>23</sub></i></b>	9.0	9.0	<b>9.0</b>

Fonte: Elaborado a partir do software J-ELECTRE-v3.0 – [github.com/Valdecy](https://github.com/Valdecy) (2025)

#### 4.6.3 Análise qualitativa do ranqueamento obtido

A Tabela 9 apresenta o ranking final de preferência do avaliador com os respectivos nomes. Foi possível observar que dados em tempo real e sensores são as tecnologias de transformação digital mais aplicáveis nas iniciativas de sustentabilidade.

Tabela 9: Ranking completo com nomes das iniciativas

Rank	Cód.	Iniciativa
1º	$a_5$	Dados em tempo real para Redução de riscos físicos: Inundações, incêndios e movimentação de terras na mina e nas comunidades anfitriãs
2º	$a_8$	Dados em tempo real para Redução da contaminação de água, solo e ar
3º	$a_{17}$	Sensores para redução da contaminação de água, solo e ar
4º	$a_{13}$	Sensores para Otimização do consumo de energia e redução de consumo de recursos energéticos não renováveis
5º	$a_{15}$	Sensores para Redução de riscos físicos: Inundações, incêndios e movimentação de terras na mina e nas comunidades anfitriãs
6º	$a_2$	Dados em tempo real para Aumento da eficiência operacional e melhoria da atratividade do produto mineral no mercado
7º	$a_3$	Dados em tempo real para Otimização do consumo de energia e redução de consumo de recursos energéticos não renováveis
8º	$a_6$	Dados em tempo real para Redução da poluição atmosférica (Particulado, pó preto, NO <sub>x</sub> , NO <sub>2</sub> , SO <sub>x</sub> , etc)
9º	$a_{25}$	Controle de Processo avançado para Redução do consumo de água doce e nova
10º	$a_{26}$	Controle de Processo avançado para Redução da contaminação de água, solo e ar
11º	$a_7$	Dados em tempo real para Redução do consumo de água doce e nova
12º	$a_9$	Automação para Aumento da eficiência operacional e melhoria da atratividade do produto mineral no mercado
13º	$a_{10}$	Automação para Otimização do consumo de energia e redução de consumo de recursos energéticos não renováveis
14º	$a_{20}$	Modelagem para Otimização do consumo de energia e redução de consumo de recursos energéticos não renováveis
15º	$a_{11}$	Automação para Melhoria das condições de trabalho (ambiente seguro, bem-estar, salário digno, etc)
16º	$a_{16}$	Sensores para Redução da poluição atmosférica (Particulado, Pó preto, NO <sub>x</sub> , NO <sub>2</sub> , SO <sub>x</sub> , etc)
17º	$a_{22}$	Redes LTE para Aumento da eficiência operacional e melhoria da atratividade do produto mineral no mercado
18º	$a_1$	Inteligência Artificial (IA) para Otimização do consumo de energia e redução de consumo de recursos energéticos não renováveis
19º	$a_{24}$	Gêmeo digital para Otimização do consumo de energia e redução de consumo de recursos energéticos não renováveis
20º	$a_{14}$	Sensores para Mudanças climáticas - Descarbonização e redução de emissão de gases efeito estufa (GEE)
21º	$a_{27}$	Mídia Social para Transparência da performance de sustentabilidade e diálogo efetivo com as partes interessadas

22°	$a_{12}$	Sistemas de Simulações para Otimização do consumo de energia e redução de consumo de recursos energéticos não renováveis
23°	$a_{18}$	Aprendizado de Máquina para Aumento da eficiência operacional e melhoria da atratividade do produto mineral no mercado
24°	$a_{19}$	Aprendizado de Máquina para Otimização do consumo de energia e redução de consumo de recursos energéticos não renováveis
25°	$a_{21}$	Modelagem para Mudanças climáticas - Descarbonização e redução de emissão de gases efeito estufa (GEE)
26°	$a_{28}$	Sistema inteligente de gerenciamento de energia para Otimização do consumo de energia e redução de consumo de recursos energéticos não renováveis
27°	$a_4$	Dados em tempo real para Mudanças climáticas - Descarbonização e redução de emissão de gases efeito estufa (GEE)
28°	$a_{23}$	Redes LTE para Redução de riscos físicos: Inundações, incêndios e movimentação de terras na mina e nas comunidades anfitriãs

Fonte: Elaboração própria (2025)

Primeiramente, é relevante ressaltar que o entrevistado tem mais de 18 anos de experiência na mineração, divididos entre minério de alumínio, conhecido como bauxita e minério de ferro. Sua avaliação tentou levar em conta suas experiências nas mineradoras por onde passou e seu conhecimento sobre mineradoras de diferentes portes e nacionalidades, sempre tentando não pensar somente na empresa objeto de pesquisa, em que ele trabalha. O entrevistado demonstrou maior complexidade para avaliar a aplicação de certas soluções de transformação digital em algumas iniciativas de sustentabilidade cuja associação não é muito comum, como por exemplo, automação para melhoria das condições de trabalho.

Segundo o entrevistado, a indústria da mineração é em sua essência conservadora, a forma como se extrai e se beneficia o minério é, de maneira geral, a mesma desde anos atrás. E esta forma de minerar vem sendo satisfatória, o que pode ser uma razão de não haver inovações tão disruptivas no setor. Outro fator importante é a diferença de apetite existente entre as mineradoras em investir em tecnologia, sendo umas mais e outras menos, dependendo do tamanho, do tipo de minério produzido, etc.

Ao avaliar o primeiro critério de capacidades internas, o qual avalia a capacidade e autonomia da empresa para executar uma iniciativa internamente, o avaliador não deu nenhuma nota cinco, o que se deve principalmente à globalização na qual se vive atualmente. Hoje há diversas *startups* que desenvolvem soluções tecnológicas, que as mineradoras necessitam. Por esta razão, por que investir em disciplinas tão especializadas internamente, se consegue-se mais facilmente o serviço em uma empresa externa cujo *core* é a tecnologia? O que se tem, normalmente, dentro da mineração, são alguns pouco profissionais capacitados, que conseguem coordenar desenvolvimentos, que requerem o apoio de terceiros, por isso a inexistência de nota 5. Uma percepção mapeada é a aplicação de IA na mineração, que ainda se trata mais de uma vontade e euforia, “*hype*”, que uma aplicação objetiva e clara no setor. Quando o assunto é

tecnologia, dificilmente a mineração será independente para a execução das iniciativas; ao contrário, sempre requererá de empresas que desenvolvam tecnologias e inovações para estar constantemente se atualizando. Hoje, as mineradoras fomentam muito a prática de benchmarking externos para conhecer e identificar as inovações ocorrendo tanto em suas concorrentes diretas como em empresas de outros setores. Em resumo, para se atualizar em tecnologia, a mineradora tem de estar constantemente aberta para parcerias.

As alternativas mais bem avaliadas em relação aos critérios internos (nota 4) foram “Dados em tempo real para Redução do consumo de água doce e nova” e “Dados em tempo real para Redução da contaminação de água, solo e ar”, visto que o volume de água nova utilizada é uma outorga, ou seja, um ato administrativo que concede a um utilizador o direito de usar recursos hídricos por um período determinado, por esta razão é muito monitorado e controlado. Tem-se facilmente medição do volume de água captado, medidores de vazão, pH, turbidez, oxigênio dissolvido, etc. Da mesma forma, para solo e ar, há muitos instrumentos que medem a qualidade.

A automação é uma solução tecnológica que transforma digitalmente as operações da mineração, entretanto é um investimento caro, que muitas vezes não é priorizado principalmente por mineradoras de pequeno porte, que mantêm os processos tradicionais da mineração. Além disso, não é trivial calcular o retorno sobre o investimento, por exemplo para implementação de um centro de operações remotas, ou de controles avançados de processo, mas é sabido que há ganhos importantes com a implementação de tais soluções. É possível observar que as soluções de transformação digital são priorizadas quando relacionadas a ganhos de produtividade, redução de custos, aumento de utilização, disponibilidade e eficiência operacional, em geral. Quando se observa sob a perspectiva de sustentabilidade, nota-se que o critério é levado em conta, mas que ainda não é um dos primeiros fatores de decisão, mas sim um critério a mais para tomada de decisão pelo investimento.

Para o segundo critério, capacidade de articulação externa, o participante avaliou a capacidade de influenciar, articular e negociar perante alguns órgãos e agentes externos, desta forma, no geral, as notas já foram maiores devido à relevância do setor para a economia e desenvolvimento do país. Além disso, para fornecedores de serviços de tecnologia, a mineração também é forte e consegue atenção em função do seu poder de compra. A iniciativa relacionada a dados em tempo real para redução de riscos físicos recebeu nota 5, principalmente quando o foco é movimentação de terra. Desde a ocorrência dos rompimentos de barragem em Brumadinho e Mariana, os olhos se voltaram para a mineração e órgãos, como a ANM, se tornaram mais expressivos nas negociações e articulações com as mineradoras. O uso de dados

para redução de poluição atmosférica também apresentou nota elevada, pois a mineração é vitrine para muitas cidades onde estão inseridas, por esta razão a relação com os órgãos externos é de elevada articulação e influência. Uma ação extremamente restritiva de órgãos pode ser uma limitação para as operações da mineração. Neste sentido, a iniciativa de menor nota foi “Dados em tempo real para Redução do consumo de água doce e nova” pois em situações de escassez hídrica, paralisam-se as operações, ficaria evidente a pouca margem de negociação que a mineração tem com órgãos. Segundo o participante, em um cenário de escassez hídrica, há que garantir água para as pessoas, em seguida para os animais, em terceiro para a agricultura e em último lugar para a mineração, indicando baixíssima influência sobre os órgãos externos.

O terceiro critério, impacto no longo prazo, foi avaliado com notas mais elevadas, de 3 a 5, o que se deve principalmente ao tipo de iniciativas avaliadas, ou seja, sustentabilidade já preconiza longo prazo. As iniciativas que receberam nota 3, segundo o avaliador, são aquelas que demandam uma jornada para serem estudadas e alcançadas, mas depois da solução encontrada, o novo *modus operandi* é padronizado e mantido, como é o caso das modelagens, gêmeo digital e sistemas de simulação, pois são importantes para a consolidação de modelos, mas depois tendem a ser menos usados ou consultados somente em caso de mudanças. Em contrapartida, sensores, dados em tempo real e automação são um conjunto de habilitadores de elevada importância para a obtenção de resultados no longo prazo, ética e a rastreabilidade dos resultados, aumento de atratividade no mercado, redução de consumos e eficiência do negócio. Para ampliar resultados, faz-se necessário o salto tecnológico, que ainda é um abismo para mineradoras pequenas.

O quarto critério, impacto positivo no controle do aquecimento global, foi avaliado relacionando a iniciativa com aquecimento global, por exemplo o avaliador identificou baixa relação entre particulados e pó preto, ou existência de mídia com redução da taxa de aquecimento global, ao mesmo tempo que descarbonização, menor consumo de energia e de água nova teve o máximo de relação com este controle, recebendo nota 5.

O quinto critério, gestão de impacto social positivo, de forma similar ao anterior, foi avaliado refletindo se a iniciativa está relacionada com melhorias para os empregados, as comunidades do entorno e a sociedade em geral. Melhoria das condições de trabalho, transparência da performance de sustentabilidade e diálogo efetivo com as partes interessadas e redução de contaminação, de poluição e de consumo de água foram iniciativas que receberam notas máximas em virtude da relação direta com o impacto social. Ao passo que redução do consumo de energia, melhoria da atratividade do produto e até mesmo a descarbonização não foram vistos como iniciativas geradoras de impactos sociais positivos.

Segundo o avaliador, o sexto critério, ecoeficiência operacional, foi o mais fácil de avaliar, pela característica das alternativas relacionadas a produtividade, redução de consumos, entre outros. 85,7% das iniciativas foram classificadas com notas 4 ou 5. Somente a “Mídia Social para Transparência da performance de sustentabilidade e diálogo efetivo com as partes interessadas” recebeu uma nota 1, e as iniciativas que contém aprendizado de máquina que receberam notas 3, por se tratar de uma solução que traz ganhos incrementais, sendo consideradas importantes, mas não associadas a grandes saltos de ecoeficiência.

Na avaliação do último critério, ética e transferência, o avaliador deu notas máximas para as iniciativas relacionadas a sensores, dados em tempo real, controle de processo avançado e mídia digital. Segundo o participante 13, os sensores são habilitadores para dados em tempo real e estes para automação e outras tecnologias digitais. Com sensores e dados é possível gerar informação e conseqüentemente transparência. Por sua vez, automação, sistemas de simulação, aprendizado de máquina, modelagem, redes LTE, gêmeo digital e sistemas inteligentes de gerenciamento de energia não estão diretamente relacionados a transparência e ética.

A alternativa “Dados em tempo real para Redução de riscos físicos: Inundações, incêndios e movimentação de terras na mina e nas comunidades anfitriãs” está mais próximo às realidades das mineradoras, pois sensores que medem em tempo real movimentação de terra e índices pluviométricos no interior da mina e nas áreas de influência são comumente empregados. Os acidentes de rompimento de barragem ocorridos deram força às exigências externas para que fossem implementados. No longo prazo, questões relacionadas a tais riscos físicos são cada vez mais relevantes para a mineração e para as comunidades localizadas próximas às mineradoras. Esta alternativa obteve preferência sobre praticamente todas as demais alternativas, como apresentado no tópico 4.6.1.

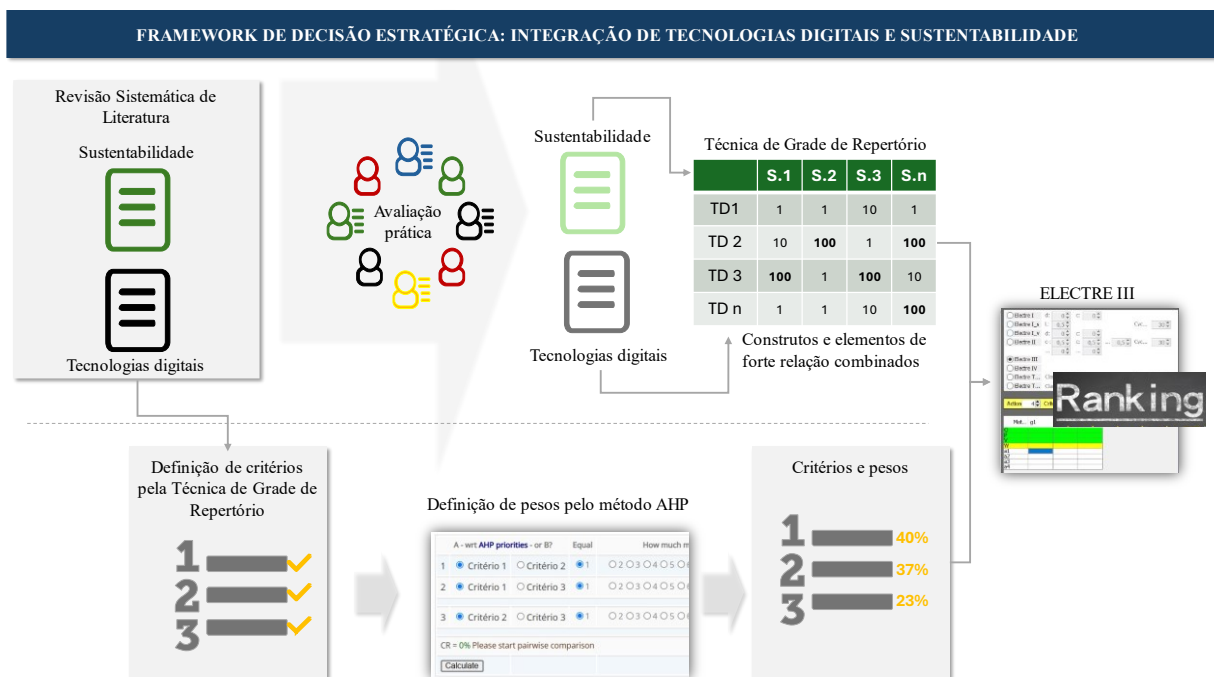
Ao avaliar a iniciativa “Dados em tempo real para Mudanças climáticas - Descarbonização e redução de emissão de gases efeito estufa (GEE)”, o participante refletiu que ainda é um desafio grande para as mineradoras, principalmente as de pequeno porte. Monitorar e acompanhar mensalmente já são práticas comuns, entretanto em tempo real ainda é um desafio grande, que requer desenvolvimento muitas vezes com fornecedores externos. Além disso, a mineração não é o principal emissor quando comparada com as siderúrgicas, o que perde a força no cenário externo. Segundo o entrevistado, o *modus operandi* para obter taxas mínimas de emissão de gases efeito estufa tende a ser estabelecido e depois mantido, assim não seriam necessários dados em tempo real para obtenção de resultados no longo prazo. São por estas razões que esta iniciativa obteve preferência fraca em relação às demais, ficando tão abaixo no ranking.

A sustentabilidade vem sendo tratada como um traço cultural da indústria de mineração, ou seja, um pilar na estratégia do setor. Busca-se ter menor contribuição para o aquecimento global, cuidar da água, solo e ar, gerar menos poluição, ser mais ecoeficiente, ter impactos sociais positivos e ser mais ético e transparente perante a sociedade e demais stakeholders. Entretanto, ainda não se pode tratar a sustentabilidade como um valor do negócio, pois muitas vezes entra em conflito com iniciativas que poderiam reduzir a eficiência e a rentabilidade do negócio. Por esta razão, pode-se pensar que os critérios relacionados a sustentabilidade, hoje, já fazem parte dos construtos utilizados para a tomada de decisão, ainda que a sustentabilidade econômica do negócio tenha um maior peso.

#### 4.7 *Framework* de decisão estratégica: Integração de tecnologias digitais e sustentabilidade - *twin transition*.

O *framework* de decisão estratégica, que integra as soluções tecnológicas digitais e iniciativas de sustentabilidades testado na empresa mineradora objeto de pesquisa pode ser visto projetado na Figura 19. A concatenação dos métodos escolhidos tornou-se possível responder à pergunta de pesquisa de como é possível identificar e priorizar soluções tecnológicas digitais e iniciativas de sustentabilidade que, vistas de forma integrada, alinhada ao *twin transition* contribuem para uma mineração mais sustentável.

Figura 19: Framework de decisão estratégica



Fonte: Elaboração própria (2025)

A combinação dos métodos permitiu chegar a um resultado totalmente aplicável à empresa objeto de pesquisa, permitindo ser um passo a passo para que outras mineradoras ou até mesmo outros setores identifiquem as prioridades rumo a sustentabilidade.

Um gap identificado é a falta de foco e priorização para as iniciativas sustentáveis de caráter social. Posto isto, na primeira etapa do *framework*, poderia ser mapeada apenas iniciativas que visem sustentabilidade social e desta forma os passos seguintes já ranqueariam alternativas focadas a este desenvolvimento, também caracterizando uma versatilidade no modelo construído. Desta forma, de forma abrangente, o *framework* alcançou o objetivo definido e variações de métodos assim como sua aplicação em outros setores podem ser inspirações para pesquisas futuras.

#### **4.8 Resumo dos resultados obtidos.**

A primeira etapa desta pesquisa, a revisão sistemática de literatura envolvendo os temas sustentabilidade e mineração, evidenciou o papel crucial desta temática para o setor. Os temas mais abordados pelos pesquisadores são aproveitamento de resíduos e economia circular, a gestão da cadeia de suprimentos verde (GCSV) e a redução de emissões de gases de efeito estufa. Esses temas são fortemente conectados às preocupações globais com sustentabilidade e apontam um caminho promissor para transformar a mineração em um setor mais ambientalmente responsável e economicamente competitivo. Pesquisadores como Kinnunen e Kaksonen (2019) mostram que, apesar de estar em estágio inicial, o aproveitamento de resíduos e a transição para uma economia circular têm grande potencial de crescimento e inovação tecnológica.

Por outro lado, iniciativas de menor representatividade, como aumento da diversidade de gênero, redução de riscos de inundações e otimização do transporte, embora também sejam relevantes para o setor, ainda não recebem muita atenção dos pesquisadores. Estudos como os de Chen *et al.* (2015) e Gupta *et al.* (2021) reforçam a importância dessas temáticas, evidenciando também serem preocupações do setor da mineração. Além disso, este resultado vai ao encontro das evidências obtidas por Monteiro *et al.* (2019), que constataram que a mineração contribui fortemente para a geração de emprego e renda na região onde está inserida (ODS 1, 2 e 8), bem como promove melhorias à comunidade quanto à infraestrutura do local (ODS 9). No entanto, há deficiências como a baixa incidência de mulheres na força de trabalho (ODS 5).

Em resumo, a sustentabilidade na mineração é uma jornada complexa, que requer equilíbrio entre as dimensões econômica, social e ambiental. Embora o setor esteja avançando com algumas iniciativas, a pesquisa aponta para a necessidade de maior esforço coletivo para incorporar práticas mais inclusivas, inovadoras e responsáveis, alinhando-se às demandas globais por desenvolvimento sustentável.

Ainda na etapa de revisão sistemática de literatura, quando pesquisada a transformação digital e mineração, a análise destacou um cenário robusto e de potencial exploração no setor, evidenciando o papel das tecnologias emergentes na melhoria das operações e no aumento da eficiência. Soluções como Big Data, Internet das Coisas, Inteligência Artificial, automação e robótica são as mais recorrentes nos estudos, refletindo sua relevância para a integração e evolução da indústria no contexto da 4ª Revolução Industrial. Tecnologias menos mencionadas, como GFP-GAN, holografia, e mídia social, ilustram iniciativas pontuais e específicas, que embora inovadoras, ainda enfrentam desafios de adoção em larga escala.

O estudo também enfatiza o potencial do blockchain para transformar a cadeia de suprimentos e a gestão de dados na mineração, promovendo transparência, rastreabilidade e automação. Apesar das diferenças de aplicação e popularidade, as soluções tecnológicas mencionadas convergem para a necessidade de integração digital e maior sustentabilidade no setor. Este mapeamento representa um ponto de partida para discussões mais aprofundadas com especialistas, buscando validar e alinhar essas soluções às demandas reais do setor.

As entrevistas com especialistas da sustentabilidade para a validação das iniciativas resultaram em um aprimoramento significativo das iniciativas mapeadas na revisão de literatura. A validação e adequação dos temas reforçaram a aderência às práticas e prioridades das principais empresas de mineração no Brasil e aos padrões internacionais de referência, como os definidos pelo SASB, MSCI ESG e S&P Yearbook. Embora nenhuma iniciativa tenha sido excluída, ajustes importantes foram realizados, como a unificação de temas relacionados à cadeia de suprimentos, detalhamento de conceitos e ampliação de escopos, assegurando maior precisão e relevância.

Destaque foi dado à inclusão de tópicos como transição energética, recuperação de áreas degradadas e fechamento de minas, além de maior ênfase na transparência e no combate ao greenwashing. Essas alterações refletem uma abordagem mais estruturada e alinhada às demandas contemporâneas de sustentabilidade, contemplando tanto os aspectos ambientais quanto os socioeconômicos.

Como resultado, a lista consolidada com 17 iniciativas revisadas e contextualizadas representa um guia robusto e atualizado para orientar a sustentabilidade no setor de mineração,

integrando as melhores práticas e prioridades estratégicas identificadas na literatura e na experiência prática das especialistas entrevistadas.

Na validação com especialistas do ramo de transformação digital, as entrevistas corroboraram os pareceres e opiniões dos especialistas, resultando na validação de 32 soluções tecnológicas de transformação digital aplicáveis à mineração. Entre as tecnologias destacam-se automação, inteligência artificial, big data, drones e aprendizado de máquina como amplamente utilizadas no setor, enquanto impressão 3D, blockchain, mídia digital e robótica têm uso mais restrito, mas potencialmente aplicável.

A principal aplicação dessas tecnologias está voltada para o aumento da produtividade, redução de custos, otimização da saúde dos ativos, tomada de decisões mais rápidas e precisas, e eficiência geral dos processos. Contudo, a vinculação da transformação digital à sustentabilidade, especialmente no âmbito social, ainda é limitada e pouco explorada como catalisadora de práticas sustentáveis na mineração.

Com a lista de iniciativas de sustentabilidade e a de soluções tecnológicas digitais validadas, foi possível a aplicação da técnica de grade de repertório, o que permitiu identificar as interações mais relevantes entre elas, evidenciando tanto os pontos de maior alinhamento quanto as lacunas existentes. Os resultados destacaram as tecnologias que mais impulsionam as iniciativas de sustentabilidade, como Inteligência Artificial, Plataformas Digitais, e Dados em Tempo Real, com ênfase em aspectos relacionados à eficiência operacional, redução de consumo energético e mitigação de riscos ambientais. Por outro lado, iniciativas mais voltadas para questões sociais, como diversidade, inclusão, direitos humanos e desenvolvimento comunitário, demonstraram menor conexão com as soluções digitais, sugerindo áreas com potencial para maior exploração tecnológica.

A variação nas respostas dos participantes, atribuída a diferenças de experiência e conhecimento, foi minimizada na consolidação dos resultados. Isso resultou em uma base inicial de 28 combinações. Dentre as 28 principais combinações, tecnologias como Dados em Tempo Real e Sensores surgiram como as mais recorrentes, enquanto iniciativas como a “Otimização do consumo de energia” se destacaram por seu alto grau de sinergia com as tecnologias digitais.

Além disso, soluções específicas, como Mídia Digital, Controle de Processo Avançado e Gêmeo Digital, mostraram-se essenciais em iniciativas pontuais, ressaltando a necessidade de diversificar o uso de tecnologias conforme os objetivos de sustentabilidade. Os resultados obtidos nesta etapa fornecem uma base sólida para o posterior ranqueamento.

Também sob abordagem da grade de repertório, a utilização da técnica resultou na definição de sete construtos relevantes para o ranqueamento das iniciativas. Esses critérios foram selecionados a partir da aplicabilidade e relevância identificadas pelos especialistas e refletem aspectos fundamentais para avaliar as iniciativas sob uma perspectiva estratégica e sustentável.

Os critérios definidos abrangem capacidades internas e de articulação externa, impacto no longo prazo, contribuição para o controle do aquecimento global, gestão de impactos sociais positivos, ecoeficiência operacional, e ética e transparência. Cada critério possui uma definição clara e uma regra de avaliação que permite uma análise sistemática e comparativa das iniciativas. Utilizando o método AHP, na média, “capacidades internas”, “capacidade de articulação externa” e “Impacto no longo prazo” foram os de menor peso para os avaliadores, enquanto “Impacto no controle do aquecimento global”, “Gestão de impactos sociais” e “Ecoeficiência operacional” são os de importância média e “Ética e transparência”, o mais destacado dos critérios, sendo quase o dobro do segundo maior peso.

Ao utilizar o método ELECTRE III, para o ranqueamento, as cinco iniciativas mais bem posicionadas foram: (i) Dados em tempo real para redução de riscos físicos: Inundações, incêndios e movimentação de terras na mina e nas comunidades anfitriãs; (ii) Dados em tempo real para redução da contaminação de água, solo e ar; (iii) Sensores para redução da contaminação de água, solo e ar; (iv) Sensores para otimização do consumo de energia e redução de consumo de recursos energéticos não renováveis e (v) Sensores para redução de riscos físicos: Inundações, incêndios e movimentação de terras na mina e nas comunidades anfitriãs.

A entrevista com o especialista revelou aspectos fundamentais sobre a intersecção entre transformação digital e sustentabilidade no setor de mineração, destacando desafios, oportunidades e perspectivas estratégicas. O avaliador, com vasta experiência no setor, ressaltou o conservadorismo tradicional da mineração, mas também reconheceu os avanços tecnológicos recentes, como sensores e dados em tempo real, que vêm permitindo melhorias significativas na eficiência operacional e na gestão ambiental. Apesar disso, ainda existem barreiras notáveis, como os custos de implementação e a dependência de fornecedores externos para soluções tecnológicas especializadas.

Finalmente, o framework obtido pôde responder à pergunta de pesquisa e entregar o objetivo definido na etapa inicial da pesquisa.

## 5. CONCLUSÕES E LIMITAÇÕES

De forma prática, os resultados obtidos na pesquisa mostram que as tecnologias digitais como sensores, dados em tempo real, automação, IA, entre outras estão presentes na literatura e no dia a dia da indústria de mineração, algumas mais outras menos, dependendo do porte e das prioridades específicas de cada organização. Quanto à sustentabilidade, ainda que mapeadas iniciativas com foco nos três pilares ESG: Ambiental, Social e Governança, o pilar social ainda é o menos explorado, principalmente quando se trata de diversidade e inclusão, riscos físicos nas regiões ao redor das operações minerárias e mobilidade quando há operações próximas a centros urbanos. Em contrapartida, iniciativas relacionadas à ecoeficiência, como maior aproveitamento dos rejeitos e resíduos, economia circular, cadeia de suprimentos verde, redução do consumo de energia e água e descarbonização são as iniciativas de maior relevância acadêmica e prática.

Este resultado reforça que o avanço na jornada pela mineração sustentável está ocorrendo, entretanto que ainda há *gaps* a serem capturados. Associar a inovação tecnológica, principalmente digital, foco do estudo, com alternativas para potencializar a sustentabilidade nos três pilares ESG é um progresso. Considerar critérios como impacto no longo prazo, priorizando-os sobre ações imediatistas, impacto no controle do aquecimento global e na sociedade seja nos trabalhadores, nas comunidades anfitriãs, nos fornecedores e nas demais partes interessadas, em complementação a resultados econômicos de rentabilidade também evidencia um avanço. Finalmente, obter um ranqueamento de alternativas a partir de um método robusto de priorização e tomada de decisão também é uma contribuição teórica e prática em virtude da ferramenta estratégica proporcionada aos tomadores de decisão.

O framework desenvolvido nesta pesquisa explicita o passo a passo para que qualquer mineradora ou até mesmo organizações de outros setores possam tomar decisões estratégicas considerando: alternativas de relevância científica e prática, combinações de alternativas de forte relação entre elas, critérios apropriados com pesos estabelecidos e, finalmente, o ranqueamento para seguir com as implementações. O framework facilita o entendimento e comunicação dos participantes do processo de tomada de decisão e suporta os resultados obtidos. Para esta pesquisa, o resultado foi inovador, uma vez que são poucos os estudos que conectam transformação digital, sustentabilidade e abordagens metodológicas robustas para uma boa tomada de decisão, principalmente no setor da mineração. Pode-se concluir que a concatenação dos métodos escolhidos tornou possível responder à pergunta de pesquisa de como é possível identificar e priorizar soluções tecnológicas digitais e iniciativas de

sustentabilidade que, vistas de forma integrada, alinhada ao *twin transition*, contribuem para uma mineração mais sustentável.

No contexto *twin transition* no setor da mineração, é essencial considerar as individualidades da empresa, garantindo que a digitalização e a sustentabilidade sejam implementadas de forma alinhada às suas particularidades operacionais e estratégicas. A empresa como um ecossistema deve integrar tecnologia e práticas sustentáveis de maneira holística, promovendo uma interação dinâmica entre processos, recursos e stakeholders. Nesse sentido, a integração das partes interessadas à empresa torna-se um fator crítico para o sucesso da transição, assegurando que fornecedores, comunidades locais e órgãos reguladores atuem de forma colaborativa. Além disso, o acompanhamento de resultados longitudinalmente permite avaliar os impactos dessas transformações ao longo do tempo, garantindo ajustes estratégicos contínuos para maximizar os benefícios ambientais, sociais e econômicos dessa transição.

Em suma, os resultados demonstram que o setor está caminhando para um modelo mais sustentável e digitalizado, mas ainda enfrenta desafios estruturais e culturais para consolidar práticas que unam plenamente inovação tecnológica e sustentabilidade como valores centrais do negócio. O avanço neste contexto dependerá de uma maior articulação entre mineradoras, fornecedores de tecnologia e órgãos reguladores, além de investimentos consistentes em tecnologias disruptivas que permitam alavancar a sustentabilidade de forma economicamente viável. Além disso, o framework elaborado se mostrou de uso pertinente neste contexto de decisão estratégica para a mineração.

As principais limitações da pesquisa são a realização das diferentes etapas em uma única empresa objeto de pesquisa. Esta condição pode esconder realidades diferentes das vivenciadas no objeto estudado, ainda que ao longo da pesquisa sempre tenha sido solicitado uma visão global e não somente da empresa em questão. Esta limitação pode ser mitigada com a inclusão de mineradoras de diferentes portes, diferentes tipos de minério explorado e diferentes nacionalidades, o que daria uma visão holística ao panorama da mineração em ordem mundial. Uma segunda limitação, também associada à primeira, corresponde ao número de participantes envolvidos na coleta de dados da pesquisa. Foram selecionados 13 especialistas em todo processo de campo, que carregam seus conhecimentos, vieses e experiências específicas, o que também pode ser mitigado a través do envolvimento de mais participantes, que podem equilibrar as diferenças de percepções e equalizar a resultados mais representativos.

Um ponto de atenção, que também pode ser considerado uma limitação, corresponde ao número de artigos selecionados na revisão sistemática de literatura. O universo de artigos relacionados à sustentabilidade correspondia, inicialmente, a 1.862, e destes foram priorizados

os 100 mais citados nas bases de dados selecionadas. Nesta filtragem, iniciativas relevantes e talvez mais recentes podem ter sido deixadas por fora do escopo da pesquisa. A ampliação desta base seria a principal ação para mitigar tal limitação. Nesta mesma lógica, caso fosse utilizado outra *string* como ["*mining industry*" and "*digital*"] ou outras combinações, a base de artigos relacionados a transformação digital poderia ser maior.

Uma última limitação, que pode ser convertida em um trabalho futuro, é a inexistência de uma análise de sensibilidade do ranqueamento obtido através do método ELECTRE III, por meio da inclusão e variações dos limites de preferência, indiferença e veto

Para o futuro da pesquisa, um ponto relevante é que outros métodos de estruturação de problema e tomada de decisão poderiam ser combinados e os resultados comparados com os obtidos nesta pesquisa. Um exemplo de método mais recente é o BWM (*Best-Worst Method*), um método de tomada de decisão multicritério proposto por Rezaei (2015). Ele reduz o número de comparações em relação a métodos tradicionais, como o AHP, mantendo a consistência das preferências dos tomadores de decisão.

A desigualdade na maturidade digital entre as mineradoras do Brasil e do mundo poderia ser explorada com o fim de identificar se o porte das mineradoras está diretamente relacionado com tal maturidade. Por fim, uma última sugestão de continuidade seria dar foco a tecnologias digitais direcionadas à sustentabilidade do pilar social, identificando meios de captar a atenção das organizações e dos governos para que também haja avanço tecnológico que vise o desenvolvimento social.

## REFERÊNCIAS

- ACE Cortex. Inovação e ESG - O futuro dos negócios passa por aqui. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://aceventures.com.br/wp-content/uploads/2021/04/GrowthReport\_ACE\_Inova%C3%A7%C3%A3o-e-ESG.pdf> acesso em: 08 jan. 2025.
- ADIANSYAH, J. S. et al. A framework for a sustainable approach to mine tailings management: disposal strategies. **Journal of cleaner production**, v. 108, p. 1050-1062, 2015.
- AHLEMANN, Frederik et al. A process framework for theoretically grounded prescriptive research in the project management field. **International Journal of Project Management**, v. 31, n. 1, p. 43-56, 2013.
- ANGOTII, M.; FERREIRA, A. C. S.; EUGÊNIO, T.; BRANCO, M.; QUEIROZ, J. M. A sustainability assessment modeling-based external account of the impacts of mining activities in Brazil. **Sustainability Accounting, Management and Policy Journal**, v. ahead-of-print, n. ahead-of-print, 2024.
- AKHTAR, S. et al. Green mining in China: Fintech's contribution to enhancing innovation performance aimed at sustainable and digital transformation in the mining sector. **Resources Policy**, v. 92, p. 104968, 2024.
- AITKEN, D. et al. Water scarcity and the impact of the mining and agricultural sectors in Chile. **Sustainability**, v. 8, n. 2, p. 128, 2016.
- ANDRADE, A.; ROSSETTI, J. P. **Governança corporativa: fundamentos, desenvolvimento e tendências**. São Paulo: Atlas, 584 p., 2007.
- ANDREWS, N. Challenges of corporate social responsibility (CSR) in domestic settings: An exploration of mining regulation vis-à-vis CSR in Ghana. **Resources Policy**, v. 47, p. 9-17, 2016.
- ANM. Exploração Mineral. Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/exploracao-mineral>>. Acesso em: 24 out. 2023.
- ARAZ, O. M. et al. Role of analytics for operational risk management in the era of big data. **Decision Sciences**, v. 51, n. 6, p. 1320-1346, 2020.
- ASKAR, Rand et al. Driving the Built Environment Twin Transition: Synergising Circular Economy and Digital Tools. In: International Conference "Coordinating Engineering for Sustainability and Resilience". Cham: Springer Nature Switzerland, p. 459-505, 2024.
- AZAPAGIC, A. Developing a framework for sustainable development indicators for the mining and minerals industry. **Journal of cleaner production**, v. 12, n. 6, p. 639-662, 2004.
- AZIMIFARD, A.; MOOSAVIRAD, S. H.; ARIAFAR, S. Selecting sustainable supplier countries for Iran's steel industry at three levels by using AHP and TOPSIS methods. **Resources Policy**, v. 57, p. 30-44, 2018.

BAG, S. et al. The role of big data and predictive analytics in developing a resilient supply chain network in the South African mining industry against extreme weather events. **International Journal of Production Economics**, v. 251, 108541, 2022.

BAG, S. et al. Big data analytics as an operational excellence approach to enhance sustainable supply chain performance. **Resources, conservation and recycling**, v. 153, p. 104559, 2020.

BASTOS CARVALHAIS BARROSO, M.; MARTINS, R. S.; FREITAS, J. S. Repertory Grid Technique and Honey's Content Analysis: gathering and processing qualitative data. **RAUSP Management Journal**, v. 59, n. 4, p. 386-401, 2024.

BARNEWOLD, L.; LOTTERMOSER, B. G. Identification of digital technologies and digitalisation trends in the mining industry. **International journal of mining science and technology**, v. 30, n. 6, p. 747-757, 2020.

BAUMAN, A. The use of the repertory grid technique in online trust research. **Qualitative Market Research: An International Journal**, v. 18, n. 3, p. 362-382, 2015.

BELINKY, A. **ODS ou ESG? A criação de um artefato para análise de instrumentos de avaliação ou orientação de negócios pela perspectiva da sustentabilidade** (Tese de Doutorado). Escola de Administração de Empresas de São Paulo, Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2022.

BLINOVA, E.; PONOMARENKO, T.; KNYSH, V. Analyzing the concept of corporate sustainability in the context of sustainable business development in the mining sector with elements of circular economy. **Sustainability**, v. 14, n. 13, 8163, 2022.

BORSATTO, A. L.; BAGGIO, D. K.; BRUM, A. L. Conceitos e definições do ESG – Environmental, social and corporate governance – no contexto evolutivo da sustentabilidade. **Desenvolvimento em Questão, [S. l.]**, v. 21, n. 59, p. e13493, 2023.

BOTELHO, M. R. et al. Rompimento das barragens de Fundão e da Mina do Córrego do Feijão em Minas Gerais, Brasil: decisões organizacionais não tomadas e lições não aprendidas. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, v. 46, p. e16, 2021.

BUCHANAN, J.; SHEPPARD, P.; VANDERPOOTEN, D. Project ranking using Electre III. In: 33rd Annual Conference of the Operational Research Society of New Zealand. ORSNZ:1998.

ÇAĞDAŞ, V.; STUBKJÆR, E. Design research for cadastral systems. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 35, p. 77-87, 2011.

CAHILL. Resilient transformation in the mining industry. Disponível em: <<https://www.ausimm.com/bulletin/bulletin-articles/resilient-transformation-in-the-mining-industry/>> Acesso em: 28 dez 2024

CHANDRASEKAR, K.; REHMAN, V. Impact of exogenous brand crises on consumer behaviour. **Marketing Intelligence & Planning**, n. ahead-of-print, 2024.

CHEN, Y. et al. A spatial assessment framework for evaluating flood risk under extreme climates. **Science of the Total Environment**, v. 538, p. 512-523, 2015.

CRUDGE, S. E.; JOHNSON, F. C. Using the repertory grid and laddering technique to determine the user's evaluative model of search engines. **Journal of Documentation**, v. 63, n. 2, p. 259-280, 2007.

CRUTZEN, P. J.; BRAUCH, H. G. (Ed.). **Paul J. Crutzen: A pioneer on atmospheric chemistry and climate change in the Anthropocene**, p. 211-215, 2016.

DA COSTA, D.; SILVA, G. J. C.; DE ASSUNÇÃO, M. A. Scopus vs. Web of Science: uma avaliação comparativa das principais bases de dados para a pesquisa acadêmica. **Cadernos do FNDE**, v. 4, n. 09, p. e0982-e0982, 2023.

DA SILVA, F. S.; DE OLIVEIRA, F. S.; SOUZA FILHO, C. R. Distribuição e contexto geológico-geomorfológico da bauxita na região de Espera Feliz, sul da serra do Caparaó, MG/ES. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 20, n. 3, 2019.

DAL MAS, F. et al. Combining Deep and Digital Technologies as a Path Towards Twin Transition: The “Future Farming” case study. **IEEE Transactions on Engineering Management**, 2024.

DANG, R. et al. Board gender diversity and ESG disclosure: Evidence from the US. 2018.

DECLARATION, M. A Green and Digital Transformation of the EU [em linha]. 2021.

DEGRAEUWE, B. et al. Impact of passenger car NOX emissions on urban NO2 pollution– Scenario analysis for 8 European cities. **Atmospheric environment**, v. 171, p. 330-337, 2017.

DE ALMEIDA, A.T. *Processo de decisão nas organizações: construindo modelos de decisão multicritério*. São Paulo, Atlas, 231p., 2013.

DE SOUSA PEREIRA, L.; COSTA MORAIS, D. The strategic choice approach to the maintenance management of a water distribution system. **Urban Water Journal**, v. 17, n. 1, p. 23-31, 2020.

DEMIRKAN, H.; SPOHRER, J. C.; WELSER, J. J. Digital innovation and strategic transformation. **It Professional**, v. 18, n. 6, p. 14-18, 2016.

DE VASCONCELOS, A. C. et al. Desempenho ESG, Risco e a (In) Existência Do Comitê De Risco Nas Empresas Brasileiras. **Revista Mineira de Contabilidade**, v. 24, n. 3, p. 63-78, 2023.

EL HILALI, W.; EL MANOUAR, A.; JANATI IDRISSE, M. Reaching sustainability during a digital transformation: a PLS approach. **International Journal of Innovation Science**, v. 12, n. 1, p. 52-79, 2020.

ELKINGTON, J. *Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business*. New Society Publishers, 1998.

ESCAMILLA, C. The Importance of Mining in Modern Society. 2024. Disponível em: <<https://mining.arizona.edu/news/importance-mining-modern-society#:~:text=Mining%20is%20indispensable%20to%20the,infrastructure%20development%2C%20and%20energy%20production>> Acesso em: 24 dez. 2024.

FONTES, W. C et al. Mortars for laying and coating produced with iron ore tailings from tailing dams. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 988-995, 2016.

FORUM ECONÔMICO MUNDIAL. Disponível em:

<<https://www.weforum.org/stories/2022/10/twin-transition-playbook-3-phases-to-accelerate-sustainable-digitization/>> Acesso em: 06 fev. 2024.

GANDHI, P.; KHANNA, S.; RAMASWAMY, S. **Which industries are the most digital (and why?)**. Harv Bus Rev 1., 2016.

GARCIA-GASTELUM, T. S. et al. Analysis of the countries' business attraction with the ELECTRE-III method. **Computer Science and Information Systems**, n. 00, p. 32-32, 2024.

GARDINER, I. A.; LITTLEJOHN, A.; BOYE, S. Researching learners' perceptions: The use of the repertory grid technique. **Language Teaching Research**, v. 28, n. 3, p. 913-930, 2024.

GASTÉLUM-CHAVIRA, D. A.; BALLARDO-CÁRDENAS, D.; LEÓN-CASTRO, E. Personnel Selection in a Coffee Shop Company Based on a Multi-Criteria Decision-Aiding and Artificial Intelligence Approach. **Mathematics**, v. 12, n. 14, p. 2196, 2024.

GIMENEZ, F. A. P.; HAYASHI, P.; GRAVE, P. S. Isomorfismo mimético em estratégia: uma ferramenta para investigação. **RAM. Revista de Administração Mackenzie**, v. 8, n. 4, p. 35-59, 2007.

FIGUEIRA, J.; ROY, B. Determining the weights of criteria in the ELECTRE type methods with a revised Simos' procedure. *European Journal of Operational Research*, 139(2): 317326, 2002.

GARCÍA CASAÑAS, C.; KOVACIC, Z. Implementing the twin transitions: A critical perspective from the Spanish energy sector. **Environmental Science & Policy**, 2024, 164, 2025.

GMI. The Global Mining Initiative. Disponível em: <<https://resolve.ngo/docs/global-mining-initiative.pdf>> Acesso em: 28 mar. 2024.

GOMES, N. L. Políticas públicas para a diversidade. **Sapere aude**, v. 8, n. 15, p. 7-22, 2017.

GRI. Our mission and history. Disponível em: <https://www.globalreporting.org/about-gri/mission-history/>> Acesso em: 26 ago. 2024.

GUPTA, P. et al. An integrated AHP-DEA multi-objective optimization model for sustainable transportation in mining industry. **Resources Policy**, v. 74, p. 101180, 2021.

HERRERA HERBERT, J.; HIDALGO LÓPEZ, A. Improving the engineering education in the raw materials sector in an advanced, decarbonised, and digital European society. 2021.

HINOJOSA-LÓPEZ, J.; AYUP GONZÁLEZ, J.; COGCO-CALDERÓN, A. R. Imagen corporativa y satisfacción laboral en potenciales empleados del sector bancario. **Investigación administrativa**, v. 49, n. 125, 2020.

IBGC - Instituto Brasileiro de Governança Corporativa. Código das melhores práticas de governança corporativa (5. ed.). São Paulo: IBGC. 2015.

IBRAM. Mineração em números 2023. Disponível em: <<chrome-extension://efaidnbmninnibpcjpcglefindmkaj/https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2024/02/mineracao-em-numero-2023.pdf>> Acesso em: 25 ago. 2024.

ICMM. Metals and Minerals. Disponível em: <<https://www.icmm.com/en-gb/mining-metals/metals>>. Acesso em: 26 fev. 2024.

ICMM. Role of Mining in National Economies: Mining Contribution Index (6th Edition). Disponível em: <<https://www.icmm.com/en-gb/research/social-performance/2022/role-of-mining-in-national-economies>>. Acesso em: 13 dez. 2023.

IIED. Breaking New Ground: Mining, Minerals and Sustainable Development. Disponível em: <<https://www.iied.org/sites/default/files/pdfs/migrate/9084IIED.pdf>>. Acesso em: 28 mar. 2024.

INFANTE, C. E. D. C.; MENDONÇA, F. M.; VALLE, R. A. B. Análise de robustez com o método Electre III: o caso da região de Campo das Vertentes em Minas Gerais. **Gestão & Produção**, v. 21, p. 245-255, 2014

ISSATAYEVA, F. M. *et al.* Fuel and energy complex of Kazakhstan: Geological and economic assessment of enterprises in the context of digital transformation. **Energies**, v. 16, n. 16, p. 6002, 2023.

JANKOWICZ, D. **The easy guide to repertory grids**. John Wiley & Sons, 2005.

JIA, P.; DIABAT, A.; MATHIYAZHAGAN, K. Analyzing the SSCM practices in the mining and mineral industry by ISM approach. **Resources Policy**, v. 46, p. 76-85, 2015.

JIJELAVA, D.; VANCLAY, F. Legitimacy, credibility and trust as the key components of a social licence to operate: An analysis of BP's projects in Georgia. **Journal of Cleaner Production**, v. 140, p. 1077-1086, 2017.

JISKANI, I. M. *et al.* Green and climate-smart mining: A framework to analyze open-pit mines for cleaner mineral production. **Resources Policy**, v. 71, p. 102007, 2021.

KEENEY, R.L.; RAIFFA, H. *Decisions with multiple objectives: preferences and value trade-offs*. New York, **John Wiley & Sons**, 1976.

KILPIN, D. V. *et al.* A Critical Review into the Digital Transformation of Land Title Management: The Case of Mining in Zimbabwe. In: *Cybersecurity in the Age of Smart Societies: Proceedings of the 14th International Conference on Global Security, Safety and Sustainability*, London, September 2022. **Cham: Springer International Publishing**, p. 31-46, 2023.

KINNUNEN, P. H. M.; KAKSONEN, A. H. Towards circular economy in mining: Opportunities and bottlenecks for tailings valorization. **Journal of Cleaner Production**, v. 228, p. 153-160, 2019.

KITCHENHAM, B. Procedures for performing systematic reviews. **Keele, UK, Keele University**, v. 33, n. 2004, p. 1-26, 2004.

KUMAR, R. *et al.* Progress in sustainable recycling and circular economy of tungsten carbide hard metal scraps for industry 5.0 and onwards. **Sustainability**, v. 15, n. 16, p. 12249, 2023.

LACERDA, Daniel Pacheco *et al.* Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção. **Gestão & produção**, v. 20, p. 741-761, 2013.

LANDGREN K.; SOOD S. Challenges in Integrated Operations Centers. OnePetro Journals, **In: Intelligent Energy Conference and Exhibition**, Amsterdã, Holanda, abril, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.2118/99485-MS>. Acesso em: 16 out. 2022.

LANFRANCHI, M. et al. Willingness to adopt and disseminate projects related to the "twin transition" on an area. The farmer's perspective. **Bulgarian Journal of Agricultural Science**, v. 29, n. 2, 2023.

LAZARENKO, Y. et al. Digital transformation in the mining sector: Exploring global technology trends and managerial issues. In: E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2021. p. 04006.

LEÃO, R.; RABELO, R. A extensão da cadeia produtiva da economia mineral no PIB brasileiro. **Sumário Executivo - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada**. DOI: <http://dx.doi.org/10.38116/td2950-port>. 2023.

LEIGHTON, M. Top Mining Countries in the World 2024. Disponível em: <https://www.cruxinvestor.com/posts/top-mining-countries-in-the-world-2024> Acesso em: 23 dez. 2024.

LEMKE, F.; CLARK, M.; WILSON, Hugh. Customer experience quality: an exploration in business and consumer contexts using repertory grid technique. **Journal of the academy of marketing science**, v. 39, p. 846-869, 2011.

LINGHU, J.; GUO, C. Digital government: The new player in improving mining companies' environmental performance?. **Resources Policy**, v. 93, p. 105094, 2024.

LOTTERMOSER, B. G. Recycling, reuse and rehabilitation of mine wastes. **Elements**, v. 7, n. 6, p. 405-410, 2011.

LUTHRA, S.; GARG, D.; HALEEM, A. An analysis of interactions among critical success factors to implement green supply chain management towards sustainability: An Indian perspective. **Resources Policy**, v. 46, p. 37-50, 2015.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, A. A. C. **Tratamento de minérios**. 2010.

MANCINI, L.; SALA, S. Social impact assessment in the mining sector: Review and comparison of indicators frameworks. **Resources Policy**, v. 57, p. 98-111, 2018.

MARCONI M. A.; LAKATOS E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 5ª ed. São Paulo. Editora ATLAS S.A., 2003.

MARTINS, R. et al. Repertory grid technique and Honey's content analysis: a methodological application to advance qualitative research in OSCM. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 54, n. 7/8, p. 802-828, 2024.

MATHIYAZHAGAN, K. et al. Application of analytical hierarchy process to evaluate pressures to implement green supply chain management. **Journal of Cleaner Production**, v. 107, p. 229-236, 2015.

MATT, C.; HESS, T.; BENLIAN, A. Digital transformation strategies. **Business & information systems engineering**, v. 57, p. 339-343, 2015.

MAYSTRE, L. Y.; PICTET, J.; SIMOS, J. **Méthodes multicritères ELECTRE**. 1.ed. Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 323p., 1994.

MERMA, Y. P. C. Mining 4.0: A Digital Transformation Approach to Mining Sector: A Peruvian Case Study. In: 2023 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET). IEEE, p. 1-4, 2023.

MITCHELL, P. Top 10 risks and opportunities for mining and metals companies in 2025. Ernest & Young Services (Pty) Limited, 2024. Disponível em <[https://www.ey.com/en\\_gl/insights/energy-resources/risks-opportunities](https://www.ey.com/en_gl/insights/energy-resources/risks-opportunities)> Acesso em: 24 dez. 2024.

MITCHELL, P. A. VAN DINTER, R. S. **Top 10 business risks and opportunities for mining and metals in 2021**. Ernest & Young Services (Pty) Limited, 2021. Disponível em <<https://miningdigital.com/top10/top-10-business-risks-and-opportunities-mining-2021>> Acesso em: 24 dez. 2024.

MONTEIRO, N. B. R.; DA SILVA, E. A.; NETO, J. M. M. Sustainable development goals in mining. **Journal of Cleaner Production**, v. 228, p. 509-520, 2019.

MORAKANYANE, R.; GRACE, A. A.; O'REILLY, P. Conceptualizing digital transformation in business organizations: A systematic review of literature. In: **30th Bled eConference Digital Transformation – From Connecting Things to Transforming Our Lives**At: Bled, Slovenia 2017.

MUDULI, K. K. et al. Environmental management and the “soft side” of organisations: Discovering the most relevant behavioural factors in green supply chains. **Business Strategy and the Environment**, v. 29, n. 4, p. 1647-1665, 2020.

MUENCH, S. et al. Towards a green & digital future. Publications Office of the European Union [em linha]. 2022.

NIJKAMP, P.; RIETVELD, P.; VOOGD, H. **Multicriteria evaluation in physical planning**. Elsevier, 1990.

NWAILA, G. T. et al. The minerals industry in the era of digital transition: An energy-efficient and environmentally conscious approach. **Resources Policy**, v. 78, p. 102851, 2022.

NWANKPA, J. K.; ROUMANI, Y. **IT capability and digital transformation: A firm performance perspective**. 2016.

OBENAU-EMLER, R.; FALAH, M.; ILLIKAINEN, M. Assessment of mine tailings as precursors for alkali-activated materials for on-site applications. **Construction and Building Materials**, v. 246, p. 118470, 2020.

ONIFADE, M. et al. Challenges and applications of digital technology in the mineral industry. **Resources Policy**, v. 85, p. 103978, 2023.

ONU-Brasil. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 28 mar. 2024.

OWEN, J. R. et al. Catastrophic tailings dam failures and disaster risk disclosure. **International journal of disaster risk reduction**, v. 42, p. 101361, 2020.

PAGE, M. J. et al. PRISMA 2020 explanation and elaboration: updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews. **bmj**, v. 372, 2021.

PARDALOS, P.M.; SISKOS, Y.; ZOPOUNIDIS, C. (Org.). *Advances in multicriteria analysis*. **Kluwer Academic Publishers**, 1995.

PEROSSA, Daniele et al. Twin transition cosmetic roadmapping tool for supporting cosmetics manufacturing. **Cleaner Environmental Systems**, v. 11, p. 100145, 2023.

Pesquisa Industrial Anual Produto 2021. Disponível em: <[https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/media/com\\_mediaibge/arquivos/1cc503bb43c34896aefbad9462834f0a.pdf](https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/media/com_mediaibge/arquivos/1cc503bb43c34896aefbad9462834f0a.pdf)> Acesso em: 26 out. 2023.

PHILO, K. G.; WEBBER-YOUNGMAN, R. C. W. A critical investigation into identifying key focus areas for the implementation of blockchain applications in the mining industry. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 124, n. 6, p. 319-330, 2024.

PMB. Panorama Mineração no Brasil. Disponível em: <<https://publicbrasil.com.br/pdf/PanoramaMineracao/PMB2023.pdf>>. Acesso em: 03 jan. 2024.

PRISMA. Disponível em: <<https://www.prisma-statement.org/prisma-2020>> Acesso em: 03 jan. 2025.

PwC (PricewaterhouseCoopers). Miners capitalise on energy transition commodities, despite challenging road to net zero: PwC's 20th annual Mine report. Disponível em <<https://www.pwc.com/gx/en/news-room/press-releases/2023/global-mine-report.html>> Acesso em: 20 jan. 2024.

RANÄNGEN, H.; LINDMAN, Å. A path towards sustainability for the Nordic mining industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 151, p. 43-52, 2017.

RE, N. U. et al. Managing Open Twin Transition in SMEs: A Case Study in the Fashion Industry. In: **European Conference on Innovation and Entrepreneurship**. Academic Conferences International Limited, p. 664-671, 2024.

REIS, J. et al. Digital transformation: a literature review and guidelines for future research. **Trends and Advances in Information Systems and Technologies: Volume 1 6**, p. 411-421, 2018.

REZAEI, Jafar. Best-worst multi-criteria decision-making method. **Omega**, v. 53, p. 49-57, 2015.

ROCKSTRÖM, J. *et al.* A safe operating space for humanity. **Nature**, v. 461, n. 7263, p. 472-475, 2009.

ROCKSTRÖM, J. *et al.* Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. **Ecology and society**, v. 14, n. 2, 2009.

RODRIGUES, D. D. Design Science Research como caminho metodológico para disciplinas e projetos de Design da Informação| Design Science Research as methodological path for Information Design subjects and projects. **InfoDesign-Revista Brasileira de Design da Informação**, v. 15, n. 1, p. 111-124, 2018.

ROSSOUW, A.; MILLÁN, G. Preparing for impact. Mine 2024: 21st edition. Disponível em: <<https://www.pwc.com/gx/en/industries/energy-utilities-resources/publications/mine.html>> Última consulta dez. 2024.

ROY, B. ELECTRE III: un algorithme de methode de classements fonde sur une representation floue des préférences en presence de critères multiples. **Cahiers de CERO**, v. 20, n. 1, p. 3-24, 1978.

ROY, B. *Méthodologie Multicritère d'Aide à la décision*. Paris, France: **Economica**, 1985.

ROY, B. *Multicriteria methodology for decision aiding*. London: **Kluwer Academic Publishers**, 1996.

ROY, B. The outranking approach and the foundations of ELECTRE Methods. **Theory and Decision**, 31(1): 49-73, 1991.

ROY, B.; BOUYSSOU, D. *Aide multicritère à la décision: méthodes et cas*. Paris: **Economica**, 1993.

SAATY, T. L. How to make a decision: the analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, v. 48, n. 1, p. 9-26, 1990.

SAATY, T. L. **Método de Análise Hierárquica**. Tradução de Wainer da Silveira e Silva, McGraw-Hill, Makron, São Paulo, 1991.

SACCOL, A. Z. Um retorno ao básico: compreendendo os paradigmas de pesquisa e sua aplicação na pesquisa em administração. **Revista de Administração da UFSM**, v. 2, n. 2, p. 250-269, 2009.

SANTOSO, I. et al. An integrated performance assessment method for SMEs fruit processing sustainability in Indonesia. **Cogent Engineering**, v. 11, n. 1, p. 2374941, 2024.

SHEARER, E.; MITCHELL, A. News use across social media platforms in 2020. 2021.

SINGH, A.; KUMAR, D.; HÖTZEL, J. IoT Based information and communication system for enhancing underground mines safety and productivity: Genesis, taxonomy and open issues. **Ad Hoc Networks**, v. 78, p. 115-129, 2018.

STOREY, K. From FIFO to LILO: The place effects of digitalization in the mining sector. **The Extractive Industries and Society**, v. 13, p. 101206, 2023.

STRATMANN, L. et al. A Framework for Leveraging Twin Transition in the Manufacturing Industry. In: **Smart, Sustainable Manufacturing in an Ever-Changing World: Proceedings of International Conference on Competitive Manufacturing (COMA'22)**. Cham: Springer International Publishing, p. 163-178, 2023.

The business Research Company – Disponível em:

<[https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/mining-global-market-report#:~:text=The%20various%20processes%20used%20for,include%20independent%20contractors%20and%20companies.&text=The%20global%20mining%20market%20size,\(CAGR\)%20of%206.1%25](https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/mining-global-market-report#:~:text=The%20various%20processes%20used%20for,include%20independent%20contractors%20and%20companies.&text=The%20global%20mining%20market%20size,(CAGR)%20of%206.1%25)> Acesso em: 20 jan. 2024.

TURNER, B. L. et al. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. **Proceedings of the national academy of sciences**, v. 100, n. 14, p. 8074-8079, 2003.

ULEWICZ, R.; KRSTIĆ, B.; INGALDI, M. Mining Industry 4.0--Opportunities and Barriers. **Acta Montanistica Slovaca**, v. 27, n. 2, 2022.

- ULUBEYLI, S.; KAZAZ, A. A multiple criteria decision-making approach to the selection of concrete pumps. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 15, n. 4, p. 369-376, 2009.
- UPADHYAY, A. et al. Exploring barriers and drivers to the implementation of circular economy practices in the mining industry. **Resources Policy**, v. 72, p. 102037, 2021.
- VAN HAU, N. *et al.* Digital Transformation in Mining Sector in Vietnam. **Inżynieria Mineralna**, n. 2, 2022.
- VIAL, G. Understanding digital transformation: A review and a research agenda. **Managing Digital Transformation**, p. 13-66, 2021.
- VIEIRA, G. H. **Análise e comparação dos métodos de decisão multicritério AHP Clássico e Multiplicativo**, Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP. 2006.
- VINCKE, P. **Multicriteria decision aid**. Bruxelles, John Wiley & Sons, 1992, 174p.
- VILLAS-BÔAS, H. C. **A Indústria Extrativa Mineral e a Transição para a Sustentabilidade**. CYTED-CETEM, 2011.
- WEI, J. et al. Driving forces analysis of energy-related carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions in Beijing: an input–output structural decomposition analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 163, p. 58-68, 2017.
- WORRALL, R. et al. Towards a sustainability criteria and indicators framework for legacy mine land. **Journal of cleaner production**, v. 17, n. 16, p. 1426-1434, 2009.
- WWF. Relatório executivo planeta vivo 2014. Disponível em <chrome-extension://efaidnbmnmbnibpcajpcgclefindmkaj/https://d3nehc6yl9qzo4.cloudfront.net/download/sumario\_executivo\_planeta\_vivo\_2014.pdf> Acesso em 23 ago.2024.
- YOKOGAWA. Transformação Digital [online]. 2021. Disponível em: <<https://www.yokogawa.com/au/solutions/solutions/digital-transformation/>> Acesso em: 23 out. 2024.
- YOUNG, A.; ROGERS, P. A review of digital transformation in mining. **Mining, Metallurgy & Exploration**, v. 36, n. 4, p. 683-699, 2019.
- YU, C. et al. Improving resource utilization efficiency in China's mineral resource-based cities: A case study of Chengde, Hebei province. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 94, p. 1-10, 2015.
- ZAMAN, Q. U. et al. Reviewing energy efficiency and environmental consciousness in the minerals industry Amidst digital transition: A comprehensive review. **Resources Policy**, v. 91, p. 104851, 2024.
- ZELENY, M. Optimal system design with multiple criteria: de novo programming approach. **Engineering Costs and Production Economics**, 10(2): 89-94, 1986.
- ZHIRONKIN, S.; TARAN, E. Development of Surface Mining 4.0 in Terms of Technological Shock in Energy Transition: A Review. **Energies**, v. 16, n. 9, p. 3639, 2023.

ZOPPELLETTO, A. et al. Interfirm Collaboration Enhancing Twin Transition: Evidence from the Italian Fashion Industry. **IEEE Transactions on Engineering Management**, 2025.