Apoio multicritério à priorização de gargalos na expedição em mineração com ELECTRE I: contribuição à gestão sustentável de sistemas de transporte de minério

Luciana Amorim Freitas (UFJF) *lucianaafreitas2@gmail.com*
Matheus da Silva Soares (UFCAT) *soaressmatheus@gmail.com*
Luiz Frederico Horácio de S. de B. Teixeira (CASNAV/IME) *luiz.frederico@ime.eb.br*
Marcos dos Santos (ESCOLA NAVAL) *marcos.santos1@marinha.mil.br*

Resumo

A indústria de mineração enfrenta desafios significativos na etapa de expedição, onde grandes volumes de minério são movimentados por sistemas complexos de correias transportadoras, pátios e silos. Gargalos operacionais, como entupimentos, sobrecargas e desgaste de correias, comprometem a produtividade e a segurança, tornando essencial sua priorização. Este trabalho aplicou o método ELECTRE I para priorizar dez gargalos identificados na área de expedição de uma mineradora de grande porte, considerando seis critérios conflitantes (impacto produtivo, repetibilidade, segurança, esforço, custo e peso do sistema) sem compensação entre dimensões críticas. Foram utilizados dados reais de paradas e manutenção, limiar de concordância C* = 0,9 e limiar de discordância D* = 0,5. Os resultados revelaram que, com C* = 0,9, o núcleo é formado por três gargalos prioritários: G1 (Entupimento AL04), G2 (Microparada TCLD01) e G3 (Sobrecarga por manuseio). A análise evidenciou a influência decisiva dos critérios segurança e impacto produtivo, reforçando a natureza não compensatória do método. Conclui-se que o ELECTRE I demonstrou robustez na priorização, recomendando-se sua integração ao planejamento de manutenção com reavaliações periódicas.

Palavras-chave: *ELECTRE I, Gargalos operacionais, Priorização multicritério, Expedição em mineração, Sustentabilidade operacional.*

Abstract

The mining industry faces significant challenges in the shipping stage, where large volumes of ore are moved through complex systems of conveyor belts, yards, and silos. Operational

bottlenecks, such as blockages, overloads, and belt wear, compromise productivity and safety, making their prioritization essential. This study applied the ELECTRE I method to prioritize ten bottlenecks identified in the shipping area of a large-scale mining unit, considering six conflicting criteria (productive impact, repeatability, safety, effort, cost, and system weight) without compensation between critical dimensions. Real data from stoppages and maintenance records were used, with a concordance threshold C* = 0,9 and a discordance threshold D* = 0,5. The results showed that, with C* = 0,9, the kernel consists of three priority bottlenecks: G1 (AL04 Clogging), G2 (TCLD01 Micro-stoppage), and G3 (Overload due to handling). The analysis highlighted the decisive influence of safety and productive impact criteria, reinforcing the non-compensatory nature of the method. It is concluded that ELECTRE I demonstrated robustness in prioritization, recommending its integration into maintenance planning with periodic re-evaluations.

Keywords: *ELECTRE I, Operational bottlenecks, Multicriteria prioritization, Mining shipping, Operational sustainability.*

1. Introdução

A indústria de mineração apresenta desafios significativos na gestão de sua cadeia produtiva, especialmente na etapa de expedição, onde grandes volumes de minério precisam ser movimentados com alta confiabilidade e eficiência. Faria, Ribeiro e Viana (2016) já tratavam explicitamente da etapa de expedição como ponto crítico da cadeia produtiva de minérios, destacando que em um ambiente de competição global, há forte pressão por melhoria de produtividade e redução de custos. Estes autores destacaram, ainda, que falhas ou paradas não planejadas na expedição comprometem diretamente o desempenho do sistema produtivo e a capacidade de atendimento da demanda.

Salomão *et al.* (2019), por sua vez, afirmaram que o setor mineral é intensivo em atividades logísticas e que a competitividade da empresa está fortemente ligada ao desempenho logístico, dado o grande volume de material movimentado ao longo da cadeia.

Devido ao elevado volume transferido, gargalos operacionais podem comprometer o atingimento das metas de produção e impactar diretamente a capacidade do sistema (RZESZOWSKA *et al*., 2025). Em sistemas de correias transportadoras, destacam-se como fontes recorrentes de restrição de capacidade o desgaste acelerado e o fim de vida útil das correias, desalinhamentos, derramamentos e sobrecargas em condições severas de operação, frequentemente associadas ao manuseio de minérios úmidos ou pegajosos (VELMURUGAN *et al*., 2014; BORTNOWSKI *et al*., 2022; BEUMER GROUP, 2023). Estudos sobre manuseio e transporte de minério de ferro também evidenciam que as transferências e quedas sucessivas do material ao longo da cadeia, da mina ao porto, geram degradação, perdas e limitações operacionais relevantes (TAVARES; CARVALHO, 2008). Nesse contexto, diretrizes de segurança em mineração apontam que deficiências na capacitação e no treinamento das equipes de operação e manutenção constituem fatores críticos tanto para a ocorrência de acidentes quanto para a redução da eficiência e da disponibilidade dos transportadores (DREYER; NEL, 2001; MINING EDITOR, 2025).

Diante desse contexto, coloca-se a seguinte questão de pesquisa: como priorizar, de forma estruturada e transparente, os gargalos de expedição de uma operação de mineração, considerando múltiplos critérios de impacto operacional, de segurança e de esforço de implementação? Na prática, essa priorização é frequentemente realizada com base em julgamentos locais e critérios não explicitados, o que reduz a transparência, dificulta a

rastreabilidade e limita a reexecução periódica da decisão quando o contexto operacional se altera.

Segundo Teixeira *et al.* (2020), os métodos de apoio à decisão multicritério (MCDA) têm se mostrado eficazes para problemas complexos de logística. Entre esses métodos, a família ELECTRE (*ELimination Et Choix Traduisant la REalité*), baseada em relações de sobreclassificação, é amplamente utilizada em situações em que não se busca uma ordenação completa, mas sim a identificação de subconjuntos de alternativas preferenciais. O método ELECTRE I é orientado à seleção e é apropriado quando se busca um subconjunto prioritário, e não um ranking completo.

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é aplicar o método ELECTRE I para apoiar a priorização dos gargalos identificados na área de expedição de uma operação de mineração, considerando critérios como impacto produtivo (horas de parada), impacto à segurança, esforço de implementação, custo e peso do sistema. O estudo se justifica pela relevância econômica e operacional da expedição na cadeia mineral e pela necessidade de alocar recursos de melhoria em contexto de restrições. Além disso, a priorização adequada tem implicações para sustentabilidade operacional, ao reduzir retrabalhos, perdas e consumo de recursos por unidade expedida, e para governança de dados, ao tornar explícitos critérios, pesos, parâmetros e rastreabilidade dos registros utilizados. Como contribuições, o trabalho: (i) propõe um procedimento multicritério não compensatório, com parâmetros transparentes e análise de sensibilidade; (ii) demonstra a aplicabilidade em um caso real de expedição; e (iii) discute implicações para eficiência, sustentabilidade e reexecução periódica do modelo em ambientes industriais orientados por dados.

2. Referencial Teórico

A Análise Multicritério de Decisão (MCDA – Multicriteria Decision Analysis) compreende um conjunto de métodos estruturados destinados a apoiar decisões que envolvem múltiplos critérios, frequentemente conflitantes. Na Engenharia de Produção, tais métodos são amplamente aplicados em problemas de priorização, alocação de recursos, seleção de projetos e definição de estratégias operacionais, especialmente quando não existe um único indicador capaz de representar adequadamente o desempenho global do sistema. Diferentemente de abordagens puramente compensatórias, os métodos multicritério permitem incorporar restrições qualitativas e critérios críticos, como segurança e risco, preservando a coerência com

políticas organizacionais e princípios de sustentabilidade (FIGUEIRA *et al.,* 2005; TEIXEIRA *et al*., 2024).

Dentre os métodos multicritério, a família ELECTRE, proposta originalmente por Bernard Roy na década de 1960, baseia-se na construção de uma relação de sobreclassificação (outranking). Nessa abordagem, afirma-se que uma alternativa a sobreclassifica outra alternativa b quando existe evidência suficiente de que a é pelo menos tão boa quanto b, sem que haja oposição forte em critérios relevantes. O ELECTRE I, especificamente, é utilizado para seleção de subconjuntos de alternativas preferenciais, por meio do cálculo de índices de concordância e discordância e da comparação com limiares pré-definidos. Roy distingue três problemáticas principais na decisão multicritério: (i) problema de escolha (Pα), cujo objetivo é identificar um subconjunto reduzido de alternativas consideradas mais adequadas; (ii) problema de ordenação (Pβ), que visa estabelecer um ranking completo ou parcial; e (iii) problema de classificação (Pγ), no qual alternativas são alocadas em categorias predefinidas. (ROY, 1996; ROY e BOUYSSOU, 1993; TAHERDOOST *et al*., 2023). O presente estudo insere-se na problemática de escolha (Pα), uma vez que o objetivo é identificar um núcleo de gargalos prioritários para intervenção.

Diferentemente de outros métodos baseados em função utilidade agregada, os métodos ELECTRE são caracterizados por uma lógica não compensatória, na qual desempenhos críticos não podem ser totalmente neutralizados por vantagens em outros critérios. O método ELECTRE I é particularmente adequado para problemas de escolha, nos quais se busca identificar um conjunto reduzido de alternativas prioritárias, e não necessariamente estabelecer uma ordenação completa. Sua estrutura baseia-se na construção de índices de concordância e discordância, a partir dos quais é definida uma relação binária de sobreclassificação. A exploração dessa relação permite identificar o núcleo (kernel), composto pelas alternativas não dominadas segundo os parâmetros definido (TEIXEIRA *et al*., 2024).

A aplicação do ELECTRE I envolve as seguintes etapas (ROY, 1996; PEREIRA e SANTOS, 2019; TEIXEIRA *et al*., 2024):

(i) Construção da matriz de decisão: cada alternativa (no caso, os gargalos operacionais) é avaliada em relação aos critérios definidos (impacto produtivo, impacto à segurança, esforço de implementação e custo). Essa matriz é a base para os cálculos subsequentes.

(ii) Normalização e atribuição de pesos: como os critérios podem ter unidades diferentes (horas, valores monetários, escalas qualitativas), é necessário normalizar os dados. Em seguida, atribuem-se pesos aos critérios, refletindo sua importância relativa no processo decisório.

(iii) Definição dos limiares (concordância, discordância): esses parâmetros determinam quando uma alternativa pode ser considerada preferível a outra.

(iv) Cálculo do índice de concordância: mede o grau em que uma alternativa a é pelo menos tão boa quanto outra alternativa b, considerando os critérios onde a é melhor ou igual a b. Esse índice é calculado como a soma dos pesos dos critérios favoráveis à alternativa a, dividida pelo total de pesos.

(v) Cálculo do índice de discordância: avalia a intensidade da desvantagem de a em relação a b nos critérios onde a é pior. Se essa desvantagem ultrapassar um limiar, a relação de sobreclassificação é bloqueada.

(vi) Construção da relação de sobreclassificação: com base nos índices e limiares, define-se quais alternativas sobreclassificam outras. Essa relação é representada em um grafo direcionado.

(vii) Identificação do kernel: o kernel é o conjunto de alternativas que não são sobreclassificadas por nenhuma outra, sendo consideradas as mais preferenciais para decisão. A principal vantagem do ELECTRE I é sua natureza não compensatória, ou seja, um desempenho muito ruim em um critério não pode ser totalmente compensado por bom desempenho em outro, preservando critérios críticos como segurança.

A aplicação de métodos de sobreclassificação em ambientes industriais contribui não apenas para a priorização técnica de intervenções, mas também para fortalecer a governança de dados e a rastreabilidade do processo decisório, elementos centrais para sistemas sustentáveis na gestão ambiental e operacional.

3. Metodologia

A metodologia adotada fundamenta-se na aplicação do método ELECTRE I, pertencente à família MCDA. O objetivo é identificar um subconjunto de gargalos prioritários para intervenção, sob uma ótica não compensatória (ROY, 1996; PEREIRA e SANTOS, 2019).

3.1 Definição das Alternativas e Critérios

Foram considerados dez gargalos críticos da etapa de expedição, codificados de G1 a G10, associados a eventos como entupimentos, quebras de equipamentos e degradação de correias transportadoras.

Tabela 1 - Gargalos analisados.

Código	Gargalo
G1	Entupimento AL04
G2	Microparada TCLD01
G3	Sobrecarga por manuseio
G4	Quebra Retomadora Pátio
G5	Entupimento TR04
G6	Desgaste Correia A
G7	Quebra Alimentador Terminal03
G8	Desgaste Correia B
G9	Sobrevelocidade Correia B
G10	Entupimento TCLD01

Fonte: Autores, 2026.

A definição dos critérios de avaliação e seus pesos foi orientada por princípios técnicos e estratégicos, considerando os impactos diretos sobre a confiabilidade e a capacidade operacional da unidade de expedição. A seleção buscou contemplar dimensões críticas do desempenho, alinhadas às metas de produção e segurança corporativa definidas em reuniões com equipes multidisciplinares.

- Impacto Produtivo (horas de parada): este critério reflete a perda de disponibilidade do sistema decorrente do gargalo. Quanto maior o tempo de indisponibilidade, maior o comprometimento da taxa de expedição, justificando sua classificação como critério a maximizar. A atribuição de peso 2 decorre da relevância do indicador para o cumprimento das metas de produção.
- Repetibilidade (número de eventos): a frequência de ocorrência indica a persistência do problema e sua capacidade de gerar interrupções recorrentes. Gargalos com alta repetibilidade tendem a demandar ações estruturais, justificando sua inclusão como critério a maximizar, com peso 1.
- Impacto em Segurança (escala 0 a 10): este critério avalia o potencial de risco associado ao gargalo, considerando integridade física de pessoas e equipamentos. Por se tratar de um fator crítico para a gestão operacional, foi atribuído o maior peso (3) e classificado como critério a maximizar, priorizando intervenções que reduzam riscos significativos.
- Esforço (escala 0 a 10): representa a complexidade técnica e os recursos necessários para implementação da solução. Projetos com alto esforço implicam maior consumo de

tempo e mão de obra, podendo inviabilizar ganhos rápidos. Por isso, foi definido como critério a minimizar, com peso 1.

- Custo (valor estimado em reais): o impacto financeiro é determinante para a viabilidade das ações, especialmente em cenários de restrição orçamentária. Classificado como critério a minimizar, recebeu peso 1, garantindo equilíbrio entre ganhos operacionais e sustentabilidade econômica.
- Peso do Sistema (rendimento × taxa horária): este critério expressa a contribuição do sistema afetado para a massa expedida total. Para realizar o balizamento, foi avaliado o rendimento operacional multiplicado pela taxa horária de produção de cada sistema, permitindo mensurar o impacto potencial do gargalo sobre a capacidade global. Gargalos localizados em sistemas de maior peso têm efeito mais significativo na performance da unidade, justificando sua classificação como critério a maximizar, com peso 2.

A ponderação dos critérios foi definida com base em análise de impacto operacional e alinhamento às diretrizes estratégicas da empresa, priorizando segurança e disponibilidade como fatores determinantes para a tomada de decisão.

3.2 Etapas de Implementação

De acordo com Pereira & Santos (2019) e Figueira *et al*. (2013), as etapas para implementação são as seguintes:

(i) Matriz de Decisão: a matriz cujos valores são os dados brutos coletados, está de acordo com a Tabela 2.

(ii) Cálculo da matriz de concordância C_{ik}: é a soma dos pesos dos critérios nos quais *i* é pelo menos tão favorável quanto *k*, considerando maximizar/minimizar, normalizada pelo total de pesos, conforme Equação:

$$C_{ik} = \frac{\sum_j a_i S_j a_k W_j}{\sum_j W_j}$$

Onde:

C_{ik} = índice de concordância ($0 \leq C_{ik} \leq 1$);

W = soma dos pesos = 10;

a_i S_j a_k = 1 se a_i é pelo menos tão boa quanto a_k no critério j (considerando a orientação de maximização ou minimização), e 0 caso contrário;

(iii) Cálculo da matriz de discordância d_{ik}:

$$d_{ik} = \begin{cases} 0, & se\ g_j(a_i) \geq g_j(a_k), \forall j \\ max\ \dfrac{(g_j(a_k) - g_j(a_i))}{\delta}, & caso\ contrário \end{cases}$$

Onde:

δ = max {maior avaliação j – menor avaliação j}

(iv) Construção da relação de sobreclassificação S (a S b se $C_{ik} \geq C^*$): dado o limiar de Concordância C* = 0,9 e o limiar de discordância D* = 0,5, a relação de sobreclassificação S é definida como:

$$a_i\ S\ a_k, se\ e\ somente\ se:$$

$$\begin{cases} C(a_i.a_k) \geq C^* \\ D(a_i.a_k) \leq D^* \end{cases}$$

Após esta etapa é construída a Matriz de Binária de Sobreclassificação, definindo S_{ik} com a seguinte Equação:

$$S_{ik} \begin{cases} 1, & se\ C_{ik} > C^*\ e\ d_{ik} < D^* \\ 0, & caso\ contrário \end{cases}$$

(v) Identificação do núcleo (kernel), conjunto K de alternativas não outrankeadas por nenhuma outra, a qual irá pertencer ao conjunto D;

(vi) Análise de sensibilidade do núcleo variando C* a fim de testar a estabilidade do núcleo K.

3.3 Aplicação do Método ELECTRE I

A coleta de dados foi realizada na unidade operacional, considerando histórico de paradas, registros de manutenção e estimativas de custo. A tabela com as avaliações das alternativas será apresentada, seguida do cálculo dos índices de concordância e discordância. Por fim, será exibido o kernel resultante, indicando os gargalos selecionados como prioritários. Adotou-se limiar de concordância C* = 0,9 e limiar de discordância D* = 0,5 e método foi aplicado com auxílio do software J-ELECTRE.

Foram consideradas dez alternativas (gargalos) e seis critérios, com orientação de maximizar/minimizar e pesos conforme demonstra a Tabela 2 e Tabela 3.

Tabela 2 – Matriz de decisão original.

Código	Impacto (h)	Repetibilidade	Segurança	Esforço	Custo	Peso (t/h)
G1	1.019	59	6	3	300.000	990
G2	378	11.590	5	7	200.000	2.100
G3	284	266	8	7	10.000	2.700
G4	240	25	5	8	1.500.000	2.400
G5	199	108	6	3	250.000	990
G6	170	53	7	6	2.000.000	2.280
G7	121	27	6	8	4.000.000	1.500
G8	112	113	7	6	2.000.000	2.280
G9	105	67	8	8	900.000	2.280
G10	80	88	6	3	200.000	2.100

Fonte: Autores, 2026.

Tabela 3 – Pesos e orientação dos critérios.

Critério	Peso	Orientação
Impacto produtivo	2	Maximizar
Repetibilidade	1	Maximizar
Impacto em segurança	3	Maximizar
Esforço	1	Minimizar
Custo	1	Minimizar
Peso do sistema	2	Maximizar

Fonte: Autores, 2026.

4. Resultados e Discussão

O procedimento de aplicação do método ELECTRE I compreendeu o cálculo das matrizes de concordância C_{ik} e discordância D_{ik}, a construção da relação de sobreclassificação S (a S b quando $C_{ik} \geq 0{,}9$) e a identificação do núcleo (kernel). As matrizes (Tabela 4 e Tabela 5) revelam que G3 apresenta os maiores índices de concordância (0,7 a 1,0) e baixos índices de discordância com quase todas as alternativas, resultado do excelente desempenho nos critérios de maior peso (segurança = 8 e peso do sistema = 2.700 t/h). Esses padrões intermediários explicam diretamente a formação do núcleo final composto por G1, G2 e G3.

Tabela 4 – Matriz de concordância C_{ik}.

Código	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10
G1	-	0,6	0,3	0,8	0,8	0,5	0,8	0,4	0,4	0,6
G2	0,4	-	0,4	0,8	0,6	0,4	0,7	0,4	0,5	0,6
G3	0,7	0,7	-	1,0	0,9	0,9	1,0	0,9	1,0	0,9
G4	0,2	0,5	0,0	-	0,4	0,5	0,6	0,5	0,5	0,4
G5	0,8	0,4	0,1	0,6	-	0,5	0,8	0,4	0,5	0,7
G6	0,5	0,6	0,1	0,5	0,5	-	1,0	0,9	0,5	0,7
G7	0,5	0,3	0,0	0,5	0,5	0,0	-	0,2	0,3	0,5
G8	0,6	0,6	0,1	0,5	0,6	0,8	0,8	-	0,6	0,8
G9	0,6	0,5	0,3	0,6	0,5	0,7	0,8	0,6	-	0,7
G10	0,8	0,7	0,1	0,6	0,7	0,3	0,8	0,2	0,3	-

Fonte: Autores, 2026.

Tabela 5 – Matriz de discordância D_{ik}.

Código	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10
G1	-	1,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1
G2	1,0	-	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
G3	0,1	1,0	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
G4	0,1	1,0	0,0	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
G5	0,1	1,0	0,1	0,1	-	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1
G6	0,1	1,0	0,0	0,0	0,0	-	0,0	0,0	0,0	0,0
G7	0,1	1,0	0,1	0,1	0,0	0,1	-	0,1	0,1	0,1
G8	0,1	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	0,0	0,0
G9	0,1	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	0,0
G10	0,1	1,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-

Fonte: Autores, 2026.

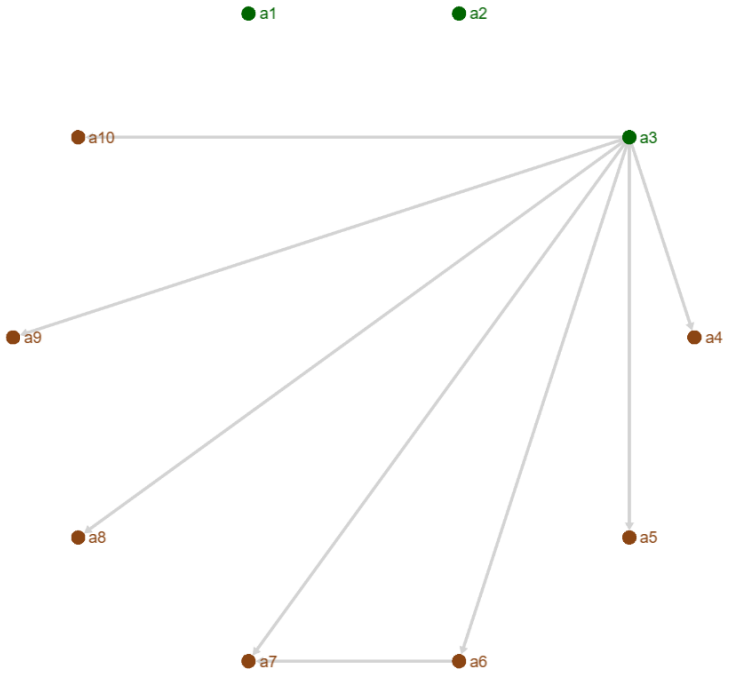
A análise com C* = 0,9 resultou em um núcleo composto por três gargalos: G1, G2, G3, conforme demonstrado na Tabela 6 e na Figura 1. Esse resultado decorre da maior exigência do limiar, que reduz o conjunto de relações de sobreclassificação e, por consequência, diminui a probabilidade de cada alternativa ser outrankeada por outra, ampliando o núcleo em relação a limiares menos restritivos. Observou-se um total de 9 relações de sobreclassificação válidas para C* = 0,9. O núcleo identificado representa o conjunto de gargalos prioritários, nos quais intervenções tendem a produzir ganhos mais robustos em disponibilidade e massa expedida, considerando o equilíbrio entre critérios a maximizar e a minimizar.

Tabela 6 – Matriz binária S (C* = 0,9).

Código	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10
G1	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
G2	0,0	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
G3	0,0	0,0	-	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
G4	0,0	0,0	0,0	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
G5	0,0	0,0	0,0	0,0	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
G6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	1,0	1,0	0,0	0,0
G7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	0,0	0,0	0,0
G8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	0,0	0,0
G9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	0,0
G10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-

Fonte: Autores, 2026.

Figura 1 – Relação de Sobreclassificação entre os gargalos.



Fonte: Autores, 2026.

A aplicação do ELECTRE I com limiar de concordância C* = 0,9 resultou em um núcleo composto por três gargalos: G1 (Entupimento AL04), G2 (Microparada TCLD01) e G3 (Sobrecarga por manuseio). A presença dessas alternativas no núcleo reflete a predominância de critérios estratégicos que orientaram a priorização.

(i) G3 destacou-se por apresentar Impacto em segurança elevado (8), associado ao maior peso (3) entre os critérios, além de Peso do sistema significativo (2.700) e custo extremamente baixo (R$ 10.000). Essa combinação favoreceu sua posição dominante, mesmo com esforço moderado (7).

(ii) G2 integrou o núcleo principalmente devido à Repetibilidade excepcional (11.590 eventos), critério a maximizar, e ao Peso do sistema elevado (2.100). Embora seu esforço seja relativamente alto (7), o impacto produtivo e a recorrência da falha reforçam sua relevância operacional.

(iii) G1 foi incluído no núcleo após o aumento do limiar para 0,9, pois deixou de ser outrankeado por outras alternativas. A análise evidencia que critérios com maior peso, como Impacto em segurança e Impacto produtivo, exerceram influência decisiva na composição do núcleo. Alternativas com desempenho superior nesses critérios, mesmo apresentando limitações em custo ou esforço, foram priorizadas. Essa característica reforça a natureza não compensatória do

ELECTRE I (Roy, 1996), preservando a importância dos critérios estratégicos definidos.

4.1 Sensibilidade ao limiar de concordância

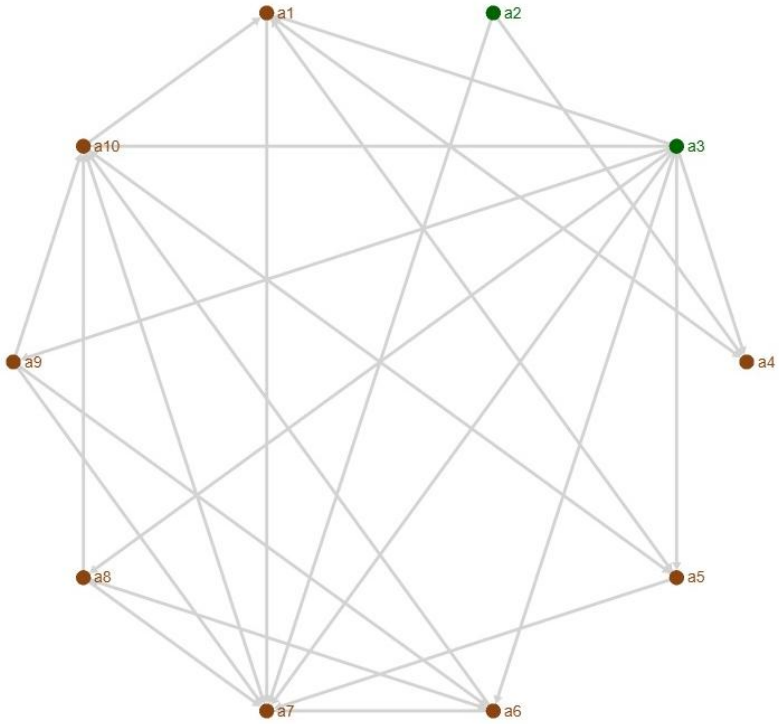
A variação do limiar de concordância impacta diretamente a densidade da relação S. Em linhas gerais, limiares mais elevados tornam a relação de sobreclassificação mais restrita (menos arestas), o que pode aumentar o núcleo, pois diminui a incidência de alternativas outrankeadas. A Tabela 7 e a Figura 2 mostram que, no conjunto analisado, ao diminuir o limiar de concordância de 0,9 para 0,7, o núcleo passou de 3 para 2 gargalos, excluindo G1 (Entupimento AL04) e mantendo G2 (Microparada TCLD01) e G3 (Sobrecarga por manuseio), refletindo o aumento no número de interações entre alternativas, ocasionando o aumento de dominâncias em pares específicos. Essa análise mostra a escolha do parâmetro C*, equilibrando rigor metodológico e discriminação prática, evitando uma priorização excessivamente restritiva.

Tabela 7 – Matriz binária S (C* = 0,7)

Código	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10
G1	-	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0
G2	0,0	-	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0
G3	1,0	0,0	-	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
G4	0,0	0,0	0,0	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
G5	1,0	0,0	0,0	0,0	-	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0
G6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	1,0	1,0	0,0	1,0
G7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	0,0	0,0	0,0
G8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	-	0,0	1,0
G9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	-	1,0
G10	1,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	0,0	-

Fonte: Autores, 2026.

Figura 2 – Relação de Sobreclassificação entre os gargalos para C* = 0,7.



Fonte: Autores, 2026.

4.2 Implicações operacionais

Os gargalos do núcleo devem compor o plano de intervenção prioritário, contemplando ações de rápida implementação, análise de causas e mitigação de riscos. Integra-se o resultado do ELECTRE I ao planejamento de manutenção, disponibilidade de recursos e restrições orçamentárias, com monitoramento contínuo e reavaliações periódicas de pesos e de C*.

Do ponto de vista de sustentabilidade e desempenho sistêmico, a priorização dos gargalos do núcleo tende a produzir ganhos que ultrapassam a disponibilidade imediata: a redução de paradas e intervenções reativas diminui variabilidade operacional, retrabalhos e perdas, contribuindo para maior eficiência no transporte interno e para menor consumo de recursos (energia, mão de obra e materiais) por unidade expedida. Além disso, ao incorporar explicitamente um critério de segurança com maior peso, o modelo reforça uma abordagem preventiva, coerente com sistemas sustentáveis na gestão ambiental, em que eventos de falha podem gerar impactos indiretos relevantes (limpeza, descarte, reprocesso e riscos operacionais).

Sob a ótica de governança de dados, a aplicação do ELECTRE I evidencia a importância da qualidade e rastreabilidade das informações utilizadas na decisão. Registros de paradas, ordens de manutenção, estimativas de custo e escalas de esforço/segurança devem possuir critérios de consolidação e atualização periódica para evitar vieses e assegurar reprodutibilidade. Nesse sentido, recomenda-se institucionalizar um fluxo de governança (fonte

→ validação → consolidação → atualização do modelo), permitindo reexecutar o método em janelas regulares e ajustar parâmetros (pesos, C*, limiares e veto) conforme a evolução do processo e a maturidade do banco de dados.

5. Considerações Finais

Conclui-se que o método ELECTRE I é adequado para a priorização de gargalos na expedição de minério em contextos decisórios multicritério, especialmente quando dimensões críticas, como segurança, não devem ser compensadas por vantagens econômicas ou operacionais. A identificação de um núcleo de gargalos prioritários oferece suporte mais objetivo ao planejamento de manutenção e de intervenções, reduzindo a subjetividade e ampliando a transparência do processo decisório.

Como limitações do estudo, destacam-se a sensibilidade dos resultados à calibração dos parâmetros do modelo, em especial os pesos dos critérios e o limiar de concordância C^*; o caráter intermediário do bloqueio por discordância adotado com $D^* = 0{,}5$; e a dependência de parte dos critérios em relação a escalas e estimativas que requerem padronização e validação contínuas.

Para trabalhos futuros, recomenda-se incorporar indicadores com maior aderência à dimensão ambiental, realizar análises adicionais de sensibilidade e estruturar um processo de governança de dados que assegure rastreabilidade e reexecução periódica do modelo, favorecendo uma priorização de gargalos mais robusta, sustentável e orientada por dados.

REFERÊNCIAS

BEUMER GROUP. **Overland belt conveyors. Beckum: BEUMER Group GmbH & Co**. KG, 2023. Disponível em: https://www.beumergroup.com/products-systems/conveyors-technology/overland-belt-conveyors/. Acesso em: Nov. 2025.

BŁAŻEJ, Ryszard; JURDZIAK, Leszek; RZESZOWSKA, Aleksandra. **Sensor-based diagnostics for conveyor belt condition monitoring and predictive refurbishment. Sensors**, Basel, v. 25, n. 11, 3459, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/s25113459.

BORTNOWSKI, Piotr et al. **Types and causes of damage to the conveyor belt – review, classification and mutual relations**. Engineering Failure Analysis, v. 138, 106520, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106520.

DREYER, W. P.; NEL, **A. The role of training and development in reducing accidents in the South African mining industry. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 101, n. 8, p. 437-442, 2001.

FARIA, Pedro Henrique Librelon; RIBEIRO, José Luis Duarte; VIANA, Herbert Ricardo Garcia. **Modelo de simulação para captura e aproveitamento de ociosidade para manutenção em sistemas de expedição de minérios.** Produção Online, v. 16, n. 4, p. 1142-1171, out./dez. 2016. DOI: https://doi.org/10.14488/1676-1901.v16i4.1990.

FIGUEIRA, José; GRECO, Salvatore; EHRGOTT, Matthias (Org.). **Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys**. New York: Springer, 2005. (International series in operations research & management science, v. 78).

MINING EDITOR. **Safety training deficiencies remain a critical issue in global mining operations**. Mining Magazine, London, jan./fev. 2025.

PEREIRA, Valdecir da Silva; SANTOS, Marcos dos. **Sistema de Apoio à Decisão "JS-ELECTRE" desenvolvido em JavaScript: uma plataforma on line com grafos dinâmicos.** In: SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA, 19., 2019, Rio de Janeiro. Anais [...]. Rio de Janeiro: Centro de Análises de Sistemas Navais, 2019.

ROY, Bernard. **Multicriteria methodology for decision aiding**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996.

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

SALOMÃO, Bárbara Heliodora Negreiros et al. **Logística dos macroprocessos em uma processadora de minério de ferro atuante no estado do Pará**. Revista Gestão Industrial, v. 15, n. 4, p. 1-19, 2019. Disponível em: https://periodicos.utfpr.edu.br/revistagi/article/view/8947. Acesso em: Nov. 2025.

TAVARES, Luís Marcelo; CARVALHO, Rodrigo Magalhães de**. Modeling iron ore degradation during handling**. In: ANNALS OF THE 3RD INTERNATIONAL MEETING ON IRONMAKING AND 2ND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON IRON ORE. 2008.

TAHERDOOST, H.; MADANCHIAN, M. ***Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods and Concepts. Encyclopedia***, v. 3, n. 1, p. 77-87, 2023. DOI: 10.3390/encyclopedia3010006.

TEIXEIRA, Luiz Frederico Horácio de Souza de Barros; RIBEIRO, P. C. C.; GOMES, C. F. S.; SANTOS, M. **Utilização do Método SAPEVO-M com parâmetros do Modelo SCOR 12.0 para ranqueamento dos fornecedores em uma cadeia de suprimentos de material hospitalar da Marinha do Brasil**. Revista Pesquisa Naval, v. 31, p. 54-66, 2019.

TEIXEIRA, Luiz Frederico Horácio de Souza de Barros. **Análise dos testes de aderência em tábuas atuariais: uma contribuição para o Sistema de Proteção Social dos militares das Forças Armadas.** 2020. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2020. DOI: 10.22409/TPP.2020.m.10479532770.

TEIXEIRA, Luiz Frederico Horácio de Souza de Barros et al. **Aplicação do método ELECTRE I para aquisição de ventiladores mecânicos não invasivos em uma operadora de saúde.** In: ANAIS DO LVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 2024, Fortaleza. Anais eletrônicos... Galoá, 2024

VELMURUGAN, Govindan et al. **Conveyor belt troubles (bulk material handling)**. International Journal of Emerging Engineering Research and Technology, v. 2, n. 3, p. 21-30, 2014.