



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do curso de Engenharia de Produção



Propostas de mitigação de anomalias com ferramentas da qualidade e métodos de apoio multicritério: um estudo de caso na indústria Siderúrgica

Marcelo Rocha Dutra Junior

João Monlevade, MG
2026

Marcelo Rocha Dutra Junior

**Propostas de mitigação de anomalias com ferramentas da
qualidade e métodos de apoio multicritério: um estudo de
caso na indústria Siderúrgica**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao curso de Engenharia de Produção do Ins-
tituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Uni-
versidade Federal de Ouro Preto, como parte
dos requisitos necessários para a obtenção
do título de Bacharel em Engenharia de Pro-
dução.

Orientador: Prof. Dr. Samuel Martins Drei

João Monlevade, MG

2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

D978p Dutra Junior, Marcelo Rocha.

Propostas de mitigação de anomalias com ferramentas da qualidade e métodos de apoio multicritério [manuscrito]: um estudo de caso na indústria siderúrgica. / Marcelo Rocha Dutra Junior. - 2026.

87 f.: il.: color., gráf., tab.. + fluxogramas, diagramas de Ishikawa, diagramas de Pareto e Relatórios A3.

Orientador: Prof. Dr. Samuel Martins Drei.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia de Produção .

1. Controle de qualidade - Ferramentas. 2. Localização de falhas (Engenharia) - Anomalias. 3. Tomada de decisão multicritério. 4. Usinas siderúrgicas - Controle de qualidade. I. Drei, Samuel Martins. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 658.56:519.816

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6/2431



FOLHA DE APROVAÇÃO

Marcelo Rocha Dutra Junior

Propostas de mitigação de anomalias com ferramentas da qualidade e métodos de apoio multicritério: um estudo de caso na indústria siderúrgica

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção

Aprovada em 08 de julho de 2026

Membros da banca

[Doutor] - Samuel Martins Drei - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)

[Doutora] - Clarissa Barros da Cruz - (Universidade Federal de Ouro Preto)

[Doutor] - Rafael Lucas Machado Pinto - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Samuel Martins Drei, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 15/07/2026



Documento assinado eletronicamente por **Samuel Martins Drei, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/07/2026, às 08:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1137071** e o código CRC **C7795565**.

Dedico este trabalho à minha família, que estiveram ao meu lado nos momentos difíceis e felizes desta trajetória, oferecendo apoio, compreensão e força para que eu não desistisse dos meus objetivos.

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder força, sabedoria, saúde e perseverança ao longo de toda esta caminhada. Nos momentos de dificuldade, incerteza e cansaço, foi a fé que me sustentou e me deu condições para continuar seguindo em frente até alcançar esta etapa tão importante da minha vida.

Agradeço à minha família, pelo apoio, pela compreensão e pelo incentivo ao longo de toda a minha trajetória acadêmica. Cada palavra de encorajamento e cada gesto de cuidado foram fundamentais para que eu superasse as dificuldades e chegasse até esta etapa.

À minha noiva, agradeço pelo companheirismo, pela paciência e pelo apoio incondicional durante os momentos mais desafiadores. Sua presença foi essencial para que eu mantivesse a confiança e a determinação necessárias para concluir esta caminhada.

Aos meninos da República Pirajá, agradeço pela amizade, pela convivência, pelo apoio e pelos momentos de descontração ao longo dessa jornada. A parceria de vocês tornou essa caminhada mais leve e especial.

À Universidade Federal de Ouro Preto, agradeço pela oportunidade de formação, pelos conhecimentos adquiridos e pelas experiências proporcionadas durante o curso de Engenharia de Produção.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Samuel Martins Drei, agradeço pela orientação, pela disponibilidade, pela paciência e pelas contribuições essenciais para o desenvolvimento e a conclusão deste Trabalho de Conclusão de Curso.

Minha trajetória acadêmica foi marcada por mudanças, desafios e aprendizados, que contribuíram para meu crescimento pessoal e profissional.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para esta trajetória. A conclusão deste trabalho representa a realização de um objetivo construído com esforço, fé, perseverança e o apoio de pessoas especiais.

*“O valor de uma ideia inovadora está na sua execução com qualidade. Eu não falhei.
Apenas encontrei dez mil caminhos que não funcionavam.”*

— Thomas Edison

Resumo

A indústria siderúrgica apresenta processos contínuos, elevada complexidade operacional e condições severas de funcionamento, exigindo métodos estruturados para priorizar e analisar anomalias que podem afetar a segurança, a qualidade, os custos, o meio ambiente, os fatores humanos e a disponibilidade dos ativos. Este trabalho teve como objetivo propor melhorias de gestão para a mitigação de anomalias operacionais em uma unidade siderúrgica, por meio da integração do método multicritério *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) com o Relatório A3. A pesquisa é aplicada, descritiva e explicativa, com abordagem quali-quantitativa, conduzida por estudo de caso e modelagem. Foram selecionadas 32 anomalias crônicas registradas desde 2020, excluindo-se eventos atípicos ou isolados. As ocorrências foram avaliadas por dez especialistas, em escala Likert de 1 a 5, segundo os critérios produção, segurança, custo, qualidade, meio ambiente e fatores humanos. Após alinhamento técnico, as avaliações compuseram a matriz de decisão. O TOPSIS foi aplicado para calcular os coeficientes de proximidade relativa e estabelecer o ranking de criticidade. Embora as notas e os pesos dependam do julgamento dos especialistas, o método organizou o processo decisório de forma sistemática e transparente. Foram selecionadas para análise as quatro anomalias mais bem posicionadas: queda da caçamba do teleférico, descontrole de umidade na sinterização, rompimento dos tirantes de fixação e parada acidental prolongada no circuito de moagem. Para cada ocorrência, foi elaborado um Relatório A3, com ferramentas da qualidade adequadas aos dados disponíveis, como fluxograma, Diagrama de Ishikawa, Diagrama de Pareto e gráficos de controle. As análises permitiram identificar causas potenciais, propor contramedidas, elaborar planos de ação em 5W2H e definir medidas de acompanhamento e padronização associadas ao ciclo PDCA. Conclui-se que a integração entre TOPSIS e Relatório A3 pode combinar priorização quantitativa, diagnóstico estruturado e planejamento de ações, favorecendo uma gestão preventiva e orientada por dados. Contudo, a efetividade das propostas depende de sua implantação e do acompanhamento dos resultados. Estudos futuros poderão avaliar a aplicação do modelo em outras indústrias de processo contínuo.

Palavras-chave: Gestão da qualidade. TOPSIS. Relatório A3. Anomalias operacionais. Indústria siderúrgica.

Abstract

The steel industry is characterized by continuous processes, high operational complexity, and severe operating conditions, requiring structured methods to prioritize and analyze anomalies that may affect safety, quality, costs, the environment, human factors, and asset availability. This study aimed to propose management improvements for mitigating operational anomalies in a steelmaking unit by integrating the multicriteria method *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) with the A3 Report. The research is applied, descriptive, and explanatory, adopting a mixed qualitative and quantitative approach through a case study and mathematical modeling. A total of 32 chronic anomalies recorded since 2020 were selected, excluding atypical or isolated events. The occurrences were assessed by ten specialists using a five-point Likert scale for production, safety, cost, quality, environment, and human factors. After technical alignment, the assessments composed the decision matrix. TOPSIS was applied to calculate relative closeness coefficients and establish the criticality ranking. Although the scores and weights depend on expert judgment, the method organized the decision-making process systematically and transparently. The four highest-ranked anomalies were selected: the fall of a cableway bucket, uncontrolled moisture in the sintering process, rupture of fastening tie rods, and prolonged accidental shutdown in the grinding circuit. An A3 Report was developed for each occurrence using quality tools suited to the available data, including flowcharts, Ishikawa diagrams, Pareto diagrams, and control charts. The analyses supported the identification of potential causes, the proposal of countermeasures, the development of 5W2H action plans, and the definition of monitoring and standardization measures related to the PDCA cycle. It is concluded that integrating TOPSIS and the A3 Report can combine quantitative prioritization, structured diagnosis, and action planning, supporting preventive and data-driven management. However, the effectiveness of the proposals depends on their implementation and the monitoring of results. Future studies may assess the application of the model in other continuous-process industries.

Keywords: Quality management. TOPSIS. A3 Report. Operational anomalies. Steel industry.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Exemplo de fluxograma	13
Figura 2 – Exemplo de Diagrama de Ishikawa	14
Figura 3 – Diagrama de Pareto	15
Figura 4 – Exemplo de gráficos de controle	16
Figura 5 – Fluxo típico de um Relatório A3 de solução de problemas	18
Figura 6 – Classificação da pesquisa científica em engenharia de produção	28
Figura 7 – Fluxograma da falha mecânica e gráfico do comportamento da vazão de carga	47
Figura 8 – A3 da queda da caçamba	50
Figura 9 – Diagrama de Ishikawa aplicado ao descontrole de umidade das partí- culas	52
Figura 10 – A3 do descontrole de umidade na sinterização	55
Figura 11 – Comportamento da tensão mecânica atuante nos tirantes de fixação	57
Figura 12 – A3 do rompimento dos tirantes de fixação	60
Figura 13 – Diagrama de Pareto dos fatores associados de paradas acidentais prolongadas no circuito de moagem	62
Figura 14 – A3 da parada acidental prolongada no circuito de moagem	65

Lista de tabelas

Tabela 1 – Estrutura da matriz de decisão	30
Tabela 2 – Matriz de Decisão Consolidada (Escala Likert 1-5)	37
Tabela 3 – Medidas de distância de aproximação (D_i^+) e afastamento (D_i^-) das soluções ideais.	39
Tabela 4 – Ordenação hierárquica e coeficientes de proximidade relativa (CC_i). .	41
Tabela 5 – Ranking de Criticidade (Top 4 identificados pelo TOPSIS)	44

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Problema de Pesquisa	2
1.2	Contextualização do Problema de Pesquisa	3
1.3	Justificativa	5
1.4	Objetivo Geral	6
1.4.1	Objetivos Específicos	7
1.5	Organização do Trabalho	7
2	REVISÃO DA LITERATURA	9
2.1	Gestão da Qualidade	9
2.2	Ferramentas da Qualidade	12
2.2.1	Fluxograma	12
2.2.2	Diagrama de Ishikawa	14
2.2.3	Diagrama de Pareto	14
2.3	Controle Estatístico do Processo	15
2.4	Relatório A3 e solução estruturada de problemas	17
2.5	Apoio à decisão e decisão multicritério	18
2.5.1	Escolha do método TOPSIS	19
2.5.2	Etapas de aplicação do TOPSIS	20
2.5.3	Limitações e análise de sensibilidade	22
2.6	Síntese dos estudos identificados na revisão sistemática	23
3	METODOLOGIA	25
3.1	Classificação da Pesquisa	25
3.2	Priorização de Problemas (Abordagem Quantitativa)	28
3.3	Análise e Solução de Problemas (Abordagem Qualitativa)	33
4	DESENVOLVIMENTO	35
4.1	Contextualização da Unidade Industrial e dos Processos Analisados	35
4.2	Avaliação dos Especialistas e Aplicação do Método TOPSIS	36

4.2.1	Coleta de Dados e Matriz de Decisão	36
4.2.2	Ponderação e Ranqueamento Final	38
4.2.3	Análise do Resultado e Seleção do Projeto	43
4.3	Aplicação do Relatório A3 nas Falhas Operacionais Críticas . . .	44
4.3.1	Caso do Teleférico: Queda da Caçamba	45
4.3.2	Caso da Sinterização: Descontrole de Umidade das Partículas	51
4.3.3	Caso da Sinterização: Rompimento dos Tirantes de Fixação	56
4.3.4	Caso da Moagem: Parada Acidental Prolongada	61
4.4	Discussões sobre as propostas de aplicação e facilitadores de im- plementação	66
5	CONCLUSÕES	68
5.1	Limitações da pesquisa	71
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	72
	REFERÊNCIAS	74

1 Introdução

A indústria siderúrgica é amplamente reconhecida como um dos pilares fundamentais do desenvolvimento econômico e infraestrutural global. Segundo a edição de 2025 do *World Steel in Figures*, o setor de construção e infraestrutura representou 52% do uso mundial de aço em seu levantamento consolidado mais recente (2024) ([World Steel Association, 2025](#)). A produção de aço é um processo de transformação contínua que exige uma coordenação rigorosa, refletida no crescimento histórico da produção mundial, que passou de 189 milhões de toneladas em 1950 para 1.885 milhões de toneladas em 2024. No ambiente operacional de uma usina siderúrgica de grande porte, a busca pela eficiência operacional não constitui apenas uma meta financeira, mas também uma necessidade competitiva em um mercado de commodities sensível a oscilações de demanda, custos e preços ([Porter, 1989](#)).

Historicamente, a gestão da qualidade no setor metalúrgico trilhou um caminho de amadurecimento significativo. O que antes era limitado a uma inspeção visual reativa no final da linha de produção evoluiu para o conceito de Gestão da Qualidade ([Ishikawa, 1993](#)). Considera-se que a variabilidade representa um dos principais desafios para a estabilidade dos processos; portanto, a identificação precoce de anomalias em processos críticos, como a Sinterização e o Alto-Forno, contribui para o controle da qualidade e para o atendimento às especificações dos produtos ([Mourão et al., 2007](#)). A importância desta pesquisa fundamenta-se na premissa de que a qualidade deve ser gerida de forma proativa, utilizando o tratamento de anomalias como um instrumento para a melhoria contínua e para a redução de desperdícios de matéria-prima e energia ([Falconi, 2013](#)).

Estudos contemporâneos corroboram a relevância de métodos estruturados no setor. [Koul, Samantaray et al. \(2021\)](#) demonstram que a aplicação de ferramentas estatísticas clássicas em plantas siderúrgicas permite identificar falhas sistemáticas que podem ser menos perceptíveis em razão da elevada velocidade dos processos produtivos. Complementarmente, [Saied, Galal e El-Sayed \(2019\)](#) argumentam que a redução de desperdícios por meio de ferramentas de *Lean Manufacturing* pode contribuir para o aumento da sustentabilidade econômica do processo. Como material relevante para uma

economia de baixo carbono, o aço destaca-se por sua elevada reciclabilidade. Entretanto, produtos fora das especificações, retrabalhos e descartes implicam consumo adicional de energia, matérias-primas, tempo e capacidade produtiva, o que reforça a necessidade de uma gestão rigorosa da produção, voltada à redução de perdas e ao controle da qualidade.

Neste contexto, esta pesquisa integra conhecimentos relacionados à gestão da qualidade e à decisão multicritério. O desafio contemporâneo da Engenharia de Produção não reside apenas em corrigir falhas, mas também em gerenciar o conhecimento gerado por essas não conformidades, assegurando que as lições aprendidas sejam incorporadas aos processos. A problemática central envolve a capacidade de discernir, entre múltiplos desvios operacionais, quais apresentam maior criticidade e devem receber atenção prioritária. Mediante a integração do método de decisão multicritério TOPSIS (Yoon; Hwang, 1995) à estrutura de solução de problemas do Relatório A3 (Ribeiro, 2012), este trabalho propõe uma abordagem de gestão capaz de conciliar a priorização sistemática das ocorrências com a estruturação das análises e das propostas de tratamento. A escolha do TOPSIS fundamenta-se em sua capacidade de hierarquizar alternativas por meio da lógica de proximidade relativa à solução ideal, permitindo a normalização e a comparação sistemática de indicadores de diferentes naturezas. Entretanto, o método não elimina a subjetividade do processo decisório, uma vez que os critérios, os pesos e as avaliações permanecem dependentes do julgamento dos especialistas. Sua contribuição consiste em tornar esses julgamentos explícitos, organizá-los em uma matriz de decisão e aplicar um procedimento matemático uniforme às alternativas analisadas.

1.1 Problema de Pesquisa

O problema de pesquisa que motiva este estudo emerge da crescente dificuldade em priorizar ações corretivas e preventivas em sistemas produtivos de alta complexidade. Em uma unidade siderúrgica, as anomalias podem se manifestar de diversas formas: desde desgastes em equipamentos de transporte de minério até oscilações operacionais que afetam a qualidade do processo e dos produtos (World Steel Association, 2025). No dia a dia, as equipes de qualidade, operação e manutenção defrontam-se com um inventário extenso de ocorrências, muitas vezes sem uma metodologia estruturada para compará-las e hierarquizá-las. Esse cenário e a necessidade de critérios explícitos para a

definição de prioridades constituem o núcleo do problema investigado (Kardec; Nascif, 2009).

A lacuna prática reside no fato de que, na ausência de um procedimento estruturado, a tomada de decisão pode depender predominantemente da experiência individual, da ocorrência mais recente ou do impacto mais imediatamente perceptível. Embora o julgamento dos especialistas seja indispensável, a falta de critérios explícitos e de um procedimento uniforme de comparação pode reduzir a transparência e a rastreabilidade das decisões. O questionamento central deste estudo é: *Como estruturar a priorização e a proposição de ações para o tratamento de múltiplas anomalias operacionais em uma unidade siderúrgica, considerando critérios de diferentes naturezas?*.

1.2 Contextualização do Problema de Pesquisa

Sob a perspectiva da literatura científica, o desafio da priorização é tratado dentro do campo da Decisão Multicritério. Tradicionalmente, a engenharia utiliza ferramentas como a Matriz GUT (Gravidade, Urgência e Tendência) e o FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*) para a classificação de problemas e riscos. Essas ferramentas apresentam características, finalidades e procedimentos próprios, sendo amplamente utilizadas em ambientes industriais. Entretanto, seus resultados também dependem da definição das escalas de avaliação, dos critérios considerados e dos julgamentos realizados pelos participantes. Da mesma forma, a aplicação do TOPSIS neste trabalho incorpora avaliações e pesos definidos por especialistas, não eliminando a subjetividade inerente ao processo decisório.

Segundo Tzeng e Huang (2011), os métodos multicritério fornecem procedimentos estruturados para a análise de problemas que envolvem múltiplas alternativas e critérios potencialmente conflitantes. Nesse contexto, a normalização matemática tem como principal função tornar comparáveis os valores associados aos diferentes critérios, evitando que diferenças de escala determinem, isoladamente, o resultado da análise. A normalização, entretanto, não reduz necessariamente os vieses dos decisores, uma vez que as avaliações e os pesos utilizados continuam associados ao julgamento dos especialistas.

Dessa forma, o TOPSIS não transforma avaliações subjetivas em informações

totalmente objetivas. Sua contribuição consiste em organizar matematicamente os julgamentos dos especialistas, explicitar os critérios e os pesos empregados e aplicar um procedimento uniforme de cálculo para todas as alternativas. Com isso, o método favorece a sistematização, a transparência e a rastreabilidade do processo de priorização, embora a influência dos decisores permaneça presente.

Para fundamentar esta pesquisa, foi conduzida uma revisão sistemática da literatura com o objetivo de mapear os estudos relacionados à aplicação de métodos de decisão multicritério e ferramentas da qualidade na indústria siderúrgica. Cabe ressaltar que os detalhes metodológicos dessa busca — incluindo as bases consultadas, as strings utilizadas e os critérios de inclusão e exclusão — serão apresentados de forma aprofundada mais adiante, na seção dedicada ao PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*).

Inicialmente, o levantamento retornou estudos relevantes sobre a aplicação de métodos de decisão e ferramentas de melhoria no setor siderúrgico, como as investigações de Torre, Salomon e Florek-Paszkowska (2025), Koul, Samantaray *et al.* (2021) e Saied, Galal e El-Sayed (2019). Contudo, essas produções apresentam objetivos distintos do escopo central desta pesquisa. Enquanto os estudos analisados abordam temas como gestão de suprimentos, classificação de peças de reposição, redução de estoques por meio do DMAIC e redução de desperdícios por meio do VSM, observou-se, na estratégia de busca adotada, uma escassez de estudos que integrem métodos de decisão multicritério a metodologias estruturadas de análise e proposição de contramedidas para anomalias operacionais.

É nesse cenário que o método TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) se apresenta como uma alternativa compatível com o problema analisado. O método baseia-se no princípio de que a alternativa preferível deve apresentar maior proximidade em relação à solução ideal positiva e maior afastamento da solução ideal negativa (Tzeng; Huang, 2011). Sua escolha está relacionada à necessidade de ordenar um conjunto de anomalias avaliadas por múltiplos critérios, produzir um ranking completo e apresentar resultados de interpretação relativamente simples.

Outros métodos multicritério também poderiam ser empregados. O AHP, por exemplo, permite estruturar comparações par a par e pode ser utilizado na determinação

dos pesos dos critérios, mas sua aplicação direta a um número elevado de alternativas ampliaria consideravelmente a quantidade de julgamentos necessários. Os métodos ELECTRE e PROMETHEE utilizam relações de sobreclassificação e podem exigir a definição de parâmetros adicionais, como limiares de preferência, indiferença ou veto. O VIKOR, por sua vez, está associado à identificação de uma solução de compromisso entre critérios conflitantes. Dessa forma, a escolha do TOPSIS não pressupõe sua superioridade em relação aos demais métodos, mas sua adequação à estrutura da matriz de decisão, ao número de alternativas analisadas e à necessidade de obtenção de uma ordenação completa.

Paralelamente, o Relatório A3, oriundo do Sistema Toyota de Produção, é utilizado para organizar a descrição do problema, a análise da situação atual, o levantamento de causas potenciais, a proposição de contramedidas e o planejamento das ações (Liker; Hoseus, 2016). A integração entre o TOPSIS e o Relatório A3 decorre da complementaridade entre suas funções. O TOPSIS apoia a priorização das anomalias, enquanto o Relatório A3 orienta o aprofundamento da análise e a estruturação das propostas de tratamento.

No âmbito teórico, a lacuna identificada não se refere à ausência de estudos sobre métodos multicritério, ferramentas da qualidade ou indústria siderúrgica considerados separadamente. A contribuição pretendida consiste em explorar uma integração ainda pouco abordada na estratégia de busca adotada, articulando o TOPSIS e o Relatório A3 para a priorização, a análise e a proposição de tratamento de anomalias operacionais no contexto siderúrgico. Dessa maneira, o estudo busca ampliar as aplicações reportadas na literatura e contribuir para a discussão sobre a integração entre métodos de apoio à decisão e metodologias estruturadas de solução de problemas.

1.3 Justificativa

A justificativa para a realização deste trabalho sustenta-se em duas dimensões: prática — com destaque para as vertentes operacional e econômica — e teórica.

No âmbito prático operacional, a pesquisa justifica-se pela necessidade de estruturar a priorização e a análise de anomalias nos processos siderúrgicos. A aplicação de um método multicritério pode favorecer maior transparência na definição das ocorrências

que devem receber atenção inicial, permitindo direcionar esforços para as anomalias consideradas mais críticas. Posteriormente, a utilização do Relatório A3 possibilita aprofundar a análise das ocorrências priorizadas, organizar as informações disponíveis e subsidiar a definição de contramedidas.

Intervenções planejadas e fundamentadas em dados tendem a proporcionar condições mais seguras do que intervenções corretivas emergenciais, uma vez que favorecem a preparação das equipes, a avaliação prévia dos riscos e a organização dos recursos necessários. Entretanto, este trabalho não mensura os efeitos das propostas sobre os indicadores de segurança, pois parte das ações não foi integralmente implementada e acompanhada ao longo do tempo.

No âmbito prático econômico, a análise estruturada de anomalias recorrentes apresenta potencial para subsidiar ações voltadas à redução de perdas, retrabalhos, paradas não programadas e consumo adicional de matérias-primas, energia e capacidade produtiva. Também pode contribuir para a preservação da disponibilidade e da vida útil dos ativos. Esses resultados, contudo, devem ser compreendidos como benefícios potenciais, uma vez que a pesquisa não realizou uma avaliação econômica da implantação das contramedidas propostas.

Por sua vez, no âmbito teórico, este TCC busca contribuir para a discussão sobre a integração entre o método TOPSIS e o Relatório A3 no contexto siderúrgico. O trabalho documenta uma possibilidade de articulação entre um método de apoio à decisão multicritério, empregado na priorização de anomalias, e uma metodologia estruturada de análise e proposição de soluções. Essa contribuição deve ser interpretada considerando as limitações do estudo de caso e a necessidade de novas aplicações e validações em diferentes contextos industriais.

1.4 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é propor ações de gestão voltadas à mitigação de anomalias operacionais na indústria siderúrgica, por meio da integração do método de apoio à decisão multicritério Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), empregado na priorização das ocorrências, com a metodologia do Relatório A3, utilizada na análise das causas e na estruturação das propostas de

tratamento.

1.4.1 Objetivos Específicos

1. Mapear e caracterizar as anomalias operacionais nos setores industriais analisados, definindo os critérios empregados em sua avaliação e na construção da matriz de decisão;
2. Aplicar o método TOPSIS para estruturar quantitativamente a priorização das anomalias e apoiar a tomada de decisão quanto ao direcionamento dos esforços para as ocorrências consideradas mais críticas;
3. Analisar as causas potenciais das anomalias prioritárias por meio do Relatório A3 e de ferramentas da qualidade selecionadas conforme as características e os dados disponíveis em cada ocorrência;
4. Propor contramedidas, planos de ação, medidas de acompanhamento e ações de padronização para as anomalias analisadas, visando subsidiar sua mitigação e contribuir para a redução da recorrência das falhas operacionais.

1.5 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado em cinco capítulos.

O Capítulo 1 apresenta a contextualização do tema, o problema de pesquisa, a relevância e a justificativa do estudo, bem como os objetivos geral e específicos. Nessa etapa, é apresentada a necessidade de integrar métodos de priorização multicritério e ferramentas estruturadas de solução de problemas para a análise e a proposição de tratamento de anomalias operacionais na indústria siderúrgica.

O Capítulo 2 reúne a fundamentação teórica necessária ao desenvolvimento da pesquisa. São abordados os conceitos relacionados à gestão da qualidade, às ferramentas da qualidade, aos gráficos de controle, ao Relatório A3 e aos sistemas de apoio à tomada

de decisão. Também são apresentados o método TOPSIS, seus fundamentos, suas etapas de aplicação, suas vantagens e limitações. Ao final do capítulo, é apresentada a síntese dos estudos identificados por meio da revisão sistemática da literatura, destacando as aplicações de ferramentas da qualidade e de métodos de decisão multicritério na indústria siderúrgica.

O Capítulo 3 descreve os procedimentos metodológicos adotados no trabalho. São apresentadas a classificação da pesquisa, a abordagem utilizada, os procedimentos de levantamento e avaliação das anomalias, a construção da matriz de decisão, a definição dos critérios e dos pesos, a aplicação do método TOPSIS e a utilização do Relatório A3 para a análise das ocorrências priorizadas e para a estruturação das propostas de tratamento. Também são descritos os procedimentos da revisão sistemática da literatura, incluindo as bases consultadas, as estratégias de busca e os critérios de inclusão e exclusão dos estudos.

O Capítulo 4 apresenta o desenvolvimento da pesquisa e os resultados obtidos. Inicialmente, são descritos o contexto industrial analisado, a avaliação realizada pelos especialistas, a consolidação da matriz de decisão e o ranqueamento das anomalias por meio do TOPSIS. Em seguida, são apresentadas as análises das quatro anomalias mais bem posicionadas no ranking: a queda da caçamba do teleférico, o descontrole de umidade das partículas na sinterização, o rompimento dos tirantes de fixação e a parada acidental prolongada no circuito de moagem. Para cada ocorrência, são apresentados o Relatório A3, as ferramentas da qualidade empregadas e as propostas de contramedidas, planos de ação, acompanhamento e padronização. O capítulo também discute as propostas de aplicação e os fatores que podem facilitar sua implementação.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões do estudo, retomando os objetivos estabelecidos e sintetizando os principais resultados da priorização e das análises realizadas. Também são discutidas as contribuições da pesquisa, suas limitações e as sugestões para trabalhos futuros, incluindo a necessidade de implantação, acompanhamento e validação das ações propostas.

2 Revisão da Literatura

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos que sustentam a abordagem proposta para a priorização e a análise de anomalias operacionais na indústria siderúrgica. A discussão articula quatro eixos principais: gestão da qualidade, ferramentas da qualidade, solução estruturada de problemas por meio do Relatório A3 e decisão multicritério com aplicação do TOPSIS. Esses eixos são complementares: a gestão da qualidade fornece os princípios de prevenção e melhoria contínua; as ferramentas da qualidade apoiam a descrição, a análise e o monitoramento dos problemas; o Relatório A3 organiza o raciocínio de solução de problemas; e o TOPSIS estrutura a priorização das anomalias segundo múltiplos critérios.

2.1 Gestão da Qualidade

O conceito de qualidade está relacionado à capacidade de produtos, serviços e processos atenderem aos requisitos estabelecidos e às necessidades das partes interessadas, constituindo um elemento relevante para o desempenho, a confiabilidade e a competitividade das organizações (Carvalho; Paladini, 2012). Essa compreensão ultrapassa a simples verificação do produto final, pois envolve também a forma como os processos são planejados, executados, controlados e aprimorados. Em processos siderúrgicos, essa discussão assume importância particular em razão da continuidade das operações, da interdependência entre etapas produtivas e das consequências que desvios operacionais podem produzir sobre a segurança, a estabilidade do processo, os custos e a conformidade dos produtos. Nesse ambiente, uma falha localizada pode se propagar para etapas posteriores, gerar interrupções, retrabalhos, perdas de matéria-prima e redução da disponibilidade dos ativos.

Historicamente, a gestão da qualidade evoluiu de uma atuação predominantemente reativa, concentrada na inspeção do produto final, para uma abordagem preventiva e sistêmica, voltada ao controle da variabilidade, à padronização e à melhoria contínua. Com o avanço das práticas de gestão, passou-se a reconhecer que a inspeção isolada

não era suficiente para assegurar resultados consistentes, sendo necessário acompanhar o comportamento dos processos durante sua execução. As contribuições de Walter A. Shewhart foram fundamentais para a incorporação do pensamento estatístico à gestão da qualidade, especialmente pelo desenvolvimento dos gráficos de controle e pela distinção entre causas comuns e causas especiais de variação (Shewhart; Deming, 1986). Essa diferenciação permitiu compreender que determinadas variações pertencem ao funcionamento natural do sistema, enquanto outras resultam de eventos específicos que exigem investigação. Posteriormente, W. Edwards Deming difundiu e ampliou a aplicação desses princípios, relacionando-os à gestão organizacional e à melhoria contínua (Deming, 1990). Sua contribuição reforçou a importância da liderança, da aprendizagem organizacional e do aperfeiçoamento dos sistemas de trabalho.

A relação entre Shewhart, Deming e o ciclo de melhoria deve ser compreendida com precisão histórica. O ciclo inicialmente associado a Shewhart foi posteriormente difundido e adaptado por Deming, consolidando-se nas práticas gerenciais como ciclo PDCA, composto pelas etapas de planejar, executar, verificar e agir. Na etapa de planejamento, são definidos o problema, os objetivos, as causas potenciais e as ações necessárias. Na execução, as medidas planejadas são colocadas em prática. Em seguida, os resultados são verificados e comparados com as metas estabelecidas. Por fim, a etapa de agir envolve a padronização das melhorias ou a revisão do plano. Assim, o PDCA não deve ser atribuído exclusivamente a Deming, embora sua atuação tenha sido decisiva para a disseminação da lógica de melhoria contínua nas organizações (Shewhart; Deming, 1986).

Outra contribuição central é a Trilogia da Qualidade, proposta por Joseph M. Juran, composta por planejamento da qualidade, controle da qualidade e melhoria da qualidade (Juran, 1992). O planejamento está relacionado à identificação das necessidades, à definição dos requisitos e à estruturação dos processos. O controle envolve o acompanhamento do desempenho e a correção dos desvios, enquanto a melhoria busca elevar os resultados por meio da eliminação de perdas e da implantação de mudanças estruturadas. Essa abordagem evidencia que a qualidade deve ser planejada desde a definição dos processos, acompanhada durante a operação e aprimorada de forma contínua. No contexto deste estudo, a trilogia contribui para compreender que o tratamento de anomalias não se limita à correção de falhas, mas envolve também sua prevenção, o

controle das condições operacionais e a aprendizagem organizacional.

Kaoru Ishikawa também exerceu papel relevante na difusão da qualidade em todos os níveis da organização. Sua contribuição reforçou a importância da participação das equipes na identificação e na solução de problemas. Entre suas contribuições destaca-se o Diagrama de Causa e Efeito, empregado para organizar hipóteses sobre fatores que podem contribuir para determinado problema. A ferramenta permite representar visualmente a relação entre um efeito e suas possíveis causas, facilitando a discussão técnica e a organização das informações. A ferramenta não comprova isoladamente a causa-raiz, mas favorece a sistematização da análise e a orientação da coleta de evidências (Pinto, 1993). A confirmação das causas depende de registros, inspeções, medições, testes e demais evidências compatíveis com a natureza do problema.

A evolução dessas práticas também se relaciona ao desenvolvimento de sistemas formais de gestão, como a ISO 9001. A norma estabelece requisitos para sistemas de gestão da qualidade com ênfase em abordagem por processos, pensamento baseado em risco, foco no cliente, liderança, avaliação de desempenho e melhoria contínua (Ouchama; Badr; Irhirane, 2023). A abordagem por processos incentiva a compreensão das atividades como partes interligadas de um sistema, enquanto o pensamento baseado em risco favorece a identificação antecipada de situações capazes de comprometer os resultados. No ambiente siderúrgico, esses princípios contribuem para a padronização das atividades, o registro de desvios e a definição de ações voltadas à redução da recorrência de anomalias. Também favorecem a definição de responsabilidades, a rastreabilidade das decisões e a preservação do conhecimento obtido durante o tratamento dos problemas.

Dessa forma, a gestão da qualidade fornece a base conceitual para o tratamento estruturado das anomalias estudadas. Seus princípios orientam a identificação dos desvios, a análise das causas, a definição de contramedidas, o acompanhamento dos resultados e a padronização das melhorias. As ferramentas apresentadas nas seções seguintes não possuem a mesma finalidade: algumas apoiam a representação do processo, outras organizam causas potenciais, priorizam fatores ou monitoram a estabilidade. Em conjunto, reduzem a dependência exclusiva de percepções não estruturadas e favorecem análises baseadas em dados e evidências (Paladini, 2019).

2.2 Ferramentas da Qualidade

As ferramentas da qualidade constituem um conjunto amplamente utilizado na análise e na solução de problemas. Sua aplicação auxilia a representar processos, organizar dados, identificar padrões, estruturar hipóteses causais e priorizar fatores relevantes. Entretanto, essas ferramentas não eliminam o julgamento dos participantes nem substituem a validação técnica das causas e das contramedidas ([Paladini, 2019](#)).

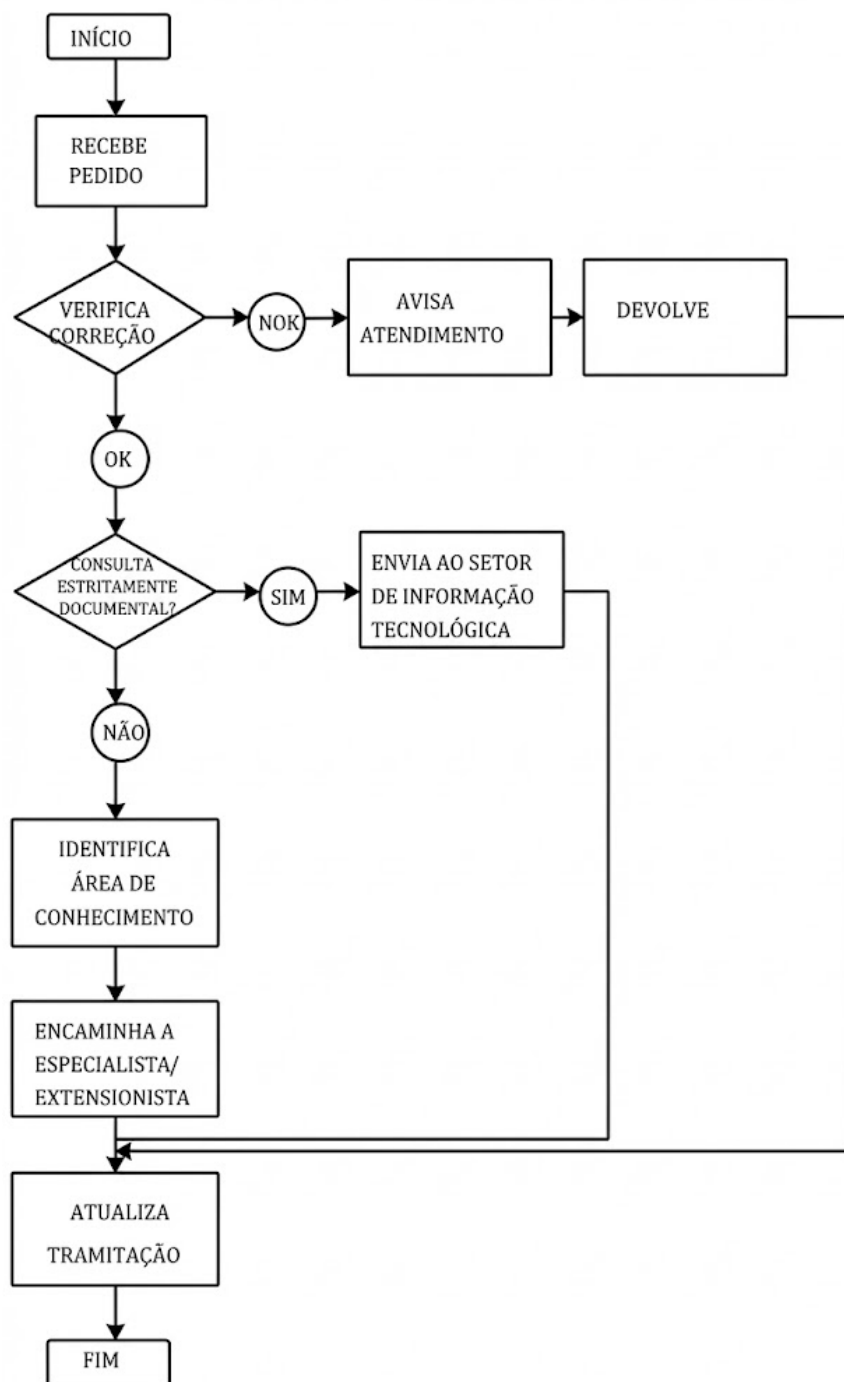
No presente trabalho, foram selecionados o fluxograma, o Diagrama de Ishikawa e o Diagrama de Pareto porque essas ferramentas atendem a necessidades distintas das ocorrências analisadas. O fluxograma apoia a compreensão da sequência operacional; o Ishikawa organiza causas potenciais; e o Pareto auxilia a identificar quais categorias concentram maior frequência ou impacto. A escolha de cada ferramenta dependeu das características do problema e da disponibilidade de dados em cada caso.

2.2.1 Fluxograma

O fluxograma é uma representação gráfica da sequência de atividades, decisões, entradas, saídas e conexões de um processo. Por meio de símbolos padronizados e linhas de fluxo, permite visualizar a lógica operacional, as interfaces entre etapas e possíveis pontos de falha, espera ou retrabalho ([Pacheco, 2019](#)).

Na análise de anomalias siderúrgicas, o fluxograma pode ser utilizado para representar a trajetória de materiais, equipamentos e informações, facilitando a localização da etapa em que o desvio se manifesta. Em vez de apresentar separadamente cada símbolo básico, a Figura 1 sintetiza a aplicação da simbologia em um processo completo.

Figura 1 – Exemplo de fluxograma



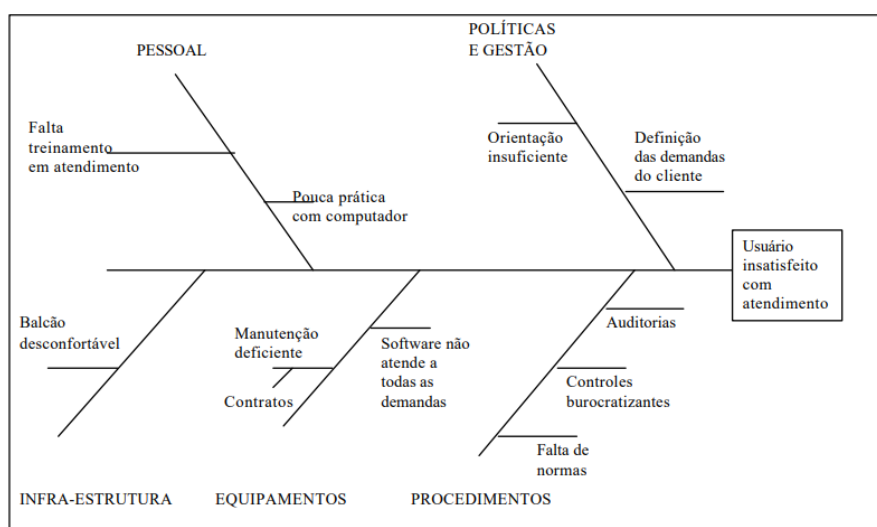
Fonte: Adaptado de [Lins \(1993\)](#).

2.2.2 Diagrama de Ishikawa

O Diagrama de Ishikawa, também denominado Diagrama de Causa e Efeito, é utilizado para organizar causas potenciais relacionadas a um problema previamente definido. Sua estrutura favorece a análise sistemática das hipóteses causais, agrupando-as em categorias que podem ser adaptadas ao contexto estudado (Lins, 1993).

Em ambientes industriais, são frequentemente utilizadas as categorias método, máquina, material, mão de obra, medição e meio ambiente. No contexto siderúrgico, essas categorias podem incluir, por exemplo, falhas de procedimentos operacionais, desgaste de componentes, variações nas características das matérias-primas, lacunas de treinamento, instrumentos sem calibração adequada e condições ambientais adversas. A inclusão de uma causa no diagrama não significa sua comprovação; ela indica uma hipótese que deve ser confrontada com registros, inspeções, medições e conhecimento técnico.

Figura 2 – Exemplo de Diagrama de Ishikawa



Fonte: Lins (1993).

2.2.3 Diagrama de Pareto

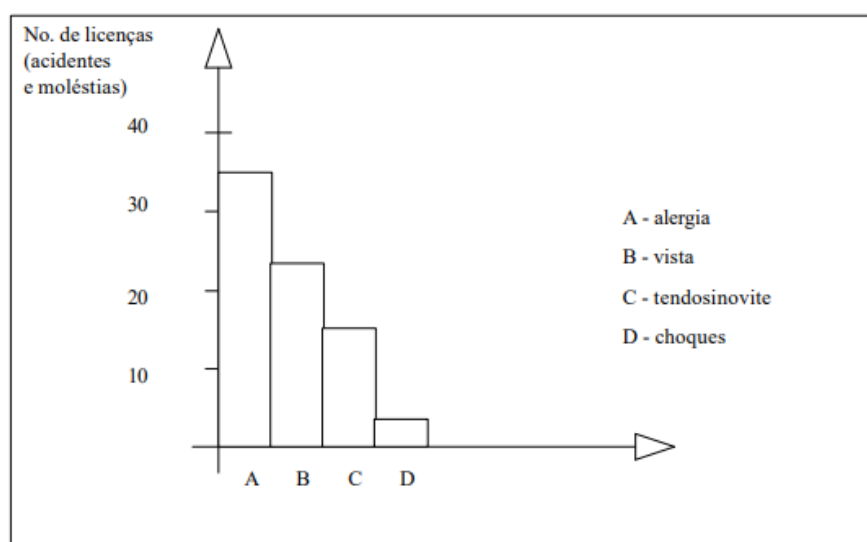
O Diagrama de Pareto é composto por barras ordenadas de forma decrescente e, geralmente, por uma curva de frequência acumulada. A ferramenta auxilia a identificar

quais categorias concentram a maior parcela das ocorrências, dos custos, dos tempos de parada ou de outro indicador selecionado (Carvalho; Paladini, 2012).

A chamada proporção 80/20 deve ser compreendida como uma referência heurística, e não como uma regra matemática obrigatória. Dependendo dos dados analisados, a concentração pode assumir proporções distintas. O valor da ferramenta está na organização das categorias segundo sua contribuição relativa para o efeito observado.

No tratamento de anomalias, o Pareto pode apoiar a priorização de fatores que merecem investigação inicial. Contudo, o diagrama não demonstra isoladamente a relação causal nem comprova que a atuação sobre as primeiras categorias produzirá maior eficiência na alocação de recursos. Essas conclusões dependem de análise contextual, validação técnica e acompanhamento dos resultados (Santos *et al.*, 2020).

Figura 3 – Diagrama de Pareto



Fonte: Lins (1993).

2.3 Controle Estatístico do Processo

O Controle Estatístico do Processo (CEP) reúne métodos estatísticos voltados ao acompanhamento da variabilidade e da estabilidade dos processos ao longo do tempo. Seu princípio central consiste em distinguir variações associadas às causas comuns, inerentes

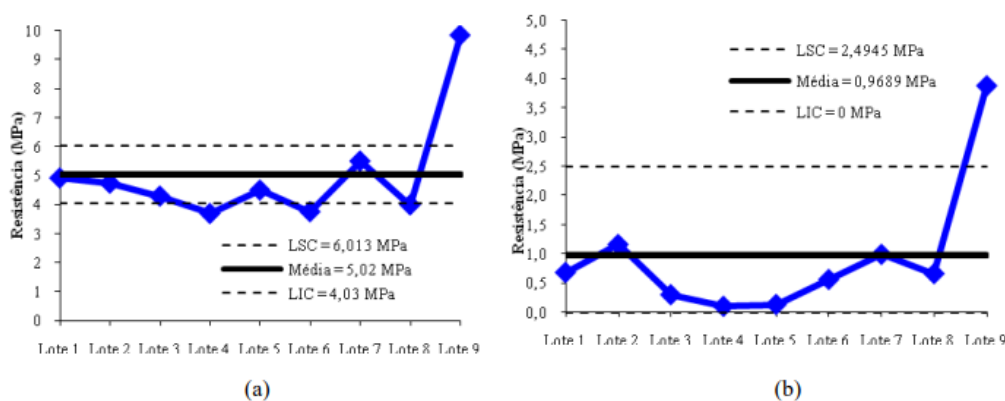
ao sistema, de variações decorrentes de causas especiais, relacionadas a alterações específicas que devem ser investigadas (Montgomery, 2020).

Entre as ferramentas do CEP, destaca-se o gráfico de controle. Esse gráfico apresenta uma linha central e limites de controle estatisticamente determinados, utilizados para avaliar a estabilidade do processo. Os limites de controle não devem ser confundidos com limites de especificação. Enquanto os limites de especificação são definidos a partir de requisitos técnicos ou de produto, os limites de controle são calculados com base na variabilidade observada no processo.

A interpretação de um gráfico de controle não se restringe à verificação de pontos fora dos limites. Sequências, tendências, ciclos ou outros padrões não aleatórios também podem indicar causas especiais, mesmo quando todos os pontos permanecem entre os limites. Portanto, a estabilidade deve ser avaliada considerando simultaneamente a posição dos pontos e o comportamento temporal da série (Montgomery, 2020).

No presente estudo, os gráficos de controle são utilizados para apoiar a compreensão da variabilidade associada a determinadas anomalias. Sua aplicação favorece a identificação de alterações no comportamento do processo, mas não comprova, isoladamente, as causas dessas alterações.

Figura 4 – Exemplo de gráficos de controle



Fonte: Andrade e Dhiel (2011).

2.4 Relatório A3 e solução estruturada de problemas

O Relatório A3 é uma abordagem estruturada de solução e comunicação de problemas desenvolvida no contexto do Sistema Toyota de Produção. Embora sua denominação esteja associada ao formato de papel A3, sua principal característica não é o tamanho da folha, mas a organização lógica e concisa do raciocínio utilizado para compreender o problema, analisar suas causas, propor contramedidas e planejar o acompanhamento (Ribeiro, 2012).

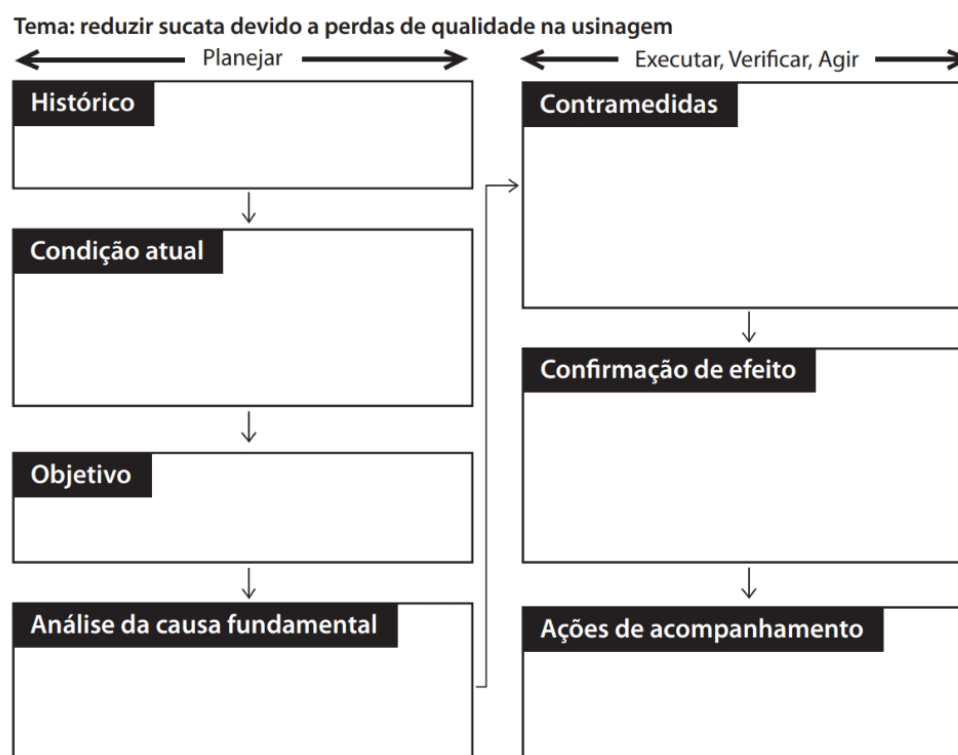
A estrutura do A3 geralmente contempla contexto, condição atual, definição do problema, objetivo, análise de causas, contramedidas, plano de implementação e acompanhamento. Essa sequência apresenta relação com a lógica do ciclo PDCA, pois organiza o planejamento, a execução proposta, a verificação e a padronização. Entretanto, quando as ações ainda não foram implantadas ou acompanhadas, o documento representa predominantemente as etapas de análise e planejamento, não sendo adequado afirmar que o ciclo foi integralmente concluído.

O A3 pode incorporar diferentes ferramentas da qualidade conforme a natureza do problema e os dados disponíveis. Fluxogramas podem representar o processo atual; diagramas de Ishikawa podem organizar causas potenciais; Paretos podem destacar fatores predominantes; gráficos de controle podem apoiar a análise da estabilidade; e planos 5W2H podem estruturar responsabilidades, prazos e recursos previstos. Dessa forma, o A3 funciona como elemento integrador das análises realizadas.

Outras abordagens também são utilizadas na solução estruturada de problemas. O MASP organiza etapas de identificação, observação, análise, plano de ação, execução, verificação, padronização e conclusão. O 8D enfatiza a formação de equipe, contenção, identificação e eliminação da causa, prevenção de recorrência e reconhecimento dos participantes.

O DMAIC estrutura projetos de melhoria nas fases definir, medir, analisar, melhorar e controlar. Em comparação, o A3 foi considerado adequado a esta pesquisa por favorecer a síntese visual, a comunicação entre áreas e a integração de diferentes ferramentas em um documento conciso. Essa escolha não implica superioridade universal, mas compatibilidade com a proposta de estruturar análises e contramedidas para as anomalias priorizadas.

Figura 5 – Fluxo típico de um Relatório A3 de solução de problemas



Fonte: [Ribeiro \(2012\)](#).

A função do A3 neste trabalho deve ser distinguida da função do TOPSIS. O A3 não realiza a priorização multicritério das anomalias. Sua aplicação ocorre após o ranqueamento, organizando a análise das ocorrências selecionadas e a proposição das ações. Essa complementaridade fundamenta a integração metodológica adotada.

2.5 Apoio à decisão e decisão multicritério

Um Sistema de Apoio à Decisão (SAD) corresponde a uma estrutura baseada em dados, modelos e recursos computacionais destinada a apoiar decisões organizacionais. Um método multicritério, por sua vez, é um procedimento analítico que pode ser utilizado de forma independente ou incorporado a um SAD. Portanto, o TOPSIS não constitui, isoladamente, um sistema de apoio à decisão, mas um método que pode integrar esse tipo de sistema.

A Decisão Multicritério, denominada na literatura por *Multiple-Criteria Decision Making* (MCDM), compreende métodos desenvolvidos para problemas que envolvem múltiplos critérios, frequentemente conflitantes. Dentro dessa categoria, o termo *Multiple-Attribute Decision Making* (MADM) é empregado para situações com um conjunto discreto e previamente conhecido de alternativas. Como este trabalho avalia 32 anomalias já identificadas, o problema pode ser classificado como MADM. Entretanto, por ser MCDM a designação mais abrangente e recorrente, adota-se neste texto a expressão decisão multicritério, esclarecendo-se que a aplicação realizada corresponde a um problema de alternativas discretas (Tzeng; Huang, 2011).

A matriz de decisão é a estrutura utilizada para representar as alternativas e seus desempenhos em cada critério. Ela não constitui necessariamente um método multicritério autônomo. A análise é realizada pelo método escolhido, que estabelece como os valores serão normalizados, ponderados, agregados e comparados.

Os métodos multicritério não eliminam a subjetividade. A definição dos critérios, das escalas, dos pesos e das avaliações pode incorporar julgamentos dos decisores. A contribuição desses métodos consiste em explicitar essas escolhas e submetê-las a um procedimento sistemático e reproduzível de comparação. Assim, a decisão torna-se mais transparente e rastreável, sem se tornar completamente objetiva.

2.5.1 Escolha do método TOPSIS

O TOPSIS, sigla de *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*, é um método amplamente empregado na literatura de decisão multicritério (Yoon; Hwang, 1995; Behzadian *et al.*, 2012). Sua lógica baseia-se no princípio de que uma alternativa é preferível quando apresenta menor distância em relação à solução ideal positiva e maior distância em relação à solução ideal negativa.

A escolha do TOPSIS neste trabalho está relacionada às características do problema analisado: existência de 32 alternativas discretas, utilização de múltiplos critérios, necessidade de incorporar pesos e interesse em produzir uma ordenação completa das anomalias. O método apresenta cálculo relativamente simples, permite trabalhar diretamente com uma matriz consolidada de avaliações e gera um coeficiente de proximidade que facilita a interpretação do ranking.

Outros métodos poderiam ser utilizados. O AHP é especialmente útil para estruturar pesos por comparações par a par, mas a comparação direta de 32 alternativas demandaria um número elevado de julgamentos. Os métodos ELECTRE e PROMETHEE utilizam relações de sobreclassificação e podem exigir parâmetros adicionais, como limites de preferência, indiferença e veto. O VIKOR busca uma solução de compromisso, com ênfase na conciliação entre utilidade coletiva e arrependimento individual. O TOPSIS foi escolhido por sua adequação à estrutura dos dados e à necessidade de obter uma ordenação completa, sem que isso represente superioridade geral em relação às demais abordagens.

A normalização empregada no TOPSIS tem a finalidade de tornar os critérios comparáveis, especialmente quando apresentam unidades ou amplitudes distintas. Esse procedimento não reduz automaticamente vieses dos especialistas. Os julgamentos permanecem presentes nos valores atribuídos e nos pesos definidos. O método estrutura matematicamente essas avaliações, ampliando a sistematização e a transparência do processo decisório.

2.5.2 Etapas de aplicação do TOPSIS

O método segue um algoritmo composto pelas etapas descritas a seguir ([Papathanasiou; Ploskas, 2018](#)).

1. Construção da Matriz de Decisão (X): organiza-se uma matriz com m alternativas e n critérios, na qual x_{ij} representa o desempenho da alternativa i no critério j .

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

2. Normalização da Matriz de Decisão (R): os valores são transformados para uma escala comparável. Na normalização vetorial:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m x_{kj}^2}}$$

3. Construção da Matriz Normalizada Ponderada (V): cada valor normalizado é multiplicado pelo peso w_j atribuído ao respectivo critério:

$$v_{ij} = w_j r_{ij}$$

em que:

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1$$

4. Determinação das Soluções Ideal Positiva e Ideal Negativa: para cada critério são identificados os valores de referência favorável e desfavorável. Para critérios de benefício, o maior valor compõe a solução ideal positiva; para critérios de custo, utiliza-se o menor valor.

$$A^+ = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+\}$$

$$A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\}$$

5. Cálculo das Distâncias: calcula-se a distância euclidiana de cada alternativa em relação às soluções ideal positiva e negativa.

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}$$

6. Cálculo do Coeficiente de Proximidade Relativa:

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-}$$

O coeficiente varia entre 0 e 1. Valores mais elevados indicam maior proximidade em relação à solução ideal positiva e maior afastamento da solução ideal negativa.

7. Ordenação das Alternativas: as alternativas são ordenadas de forma decrescente segundo o valor de C_i^* .

No contexto deste estudo, as alternativas correspondem às anomalias operacionais, e os critérios representam dimensões como produção, segurança, custo, qualidade, meio ambiente e fatores humanos. O resultado do método é um ranking utilizado para orientar a seleção das ocorrências submetidas à análise pelo Relatório A3.

2.5.3 Limitações e análise de sensibilidade

Entre as limitações do TOPSIS destaca-se a dependência dos pesos e das avaliações fornecidas pelos especialistas. Pequenas alterações nesses parâmetros podem modificar os coeficientes de proximidade e, em determinadas situações, a posição das alternativas. Por esse motivo, recomenda-se a realização de análise de sensibilidade, modificando os pesos dentro de intervalos plausíveis e verificando a estabilidade do ranking.

Outra limitação é a possibilidade de reversão de ranking. Esse fenômeno ocorre quando a inclusão ou a exclusão de uma alternativa altera a posição relativa das demais, mesmo que seus desempenhos permaneçam inalterados. Sua relevância depende da estrutura dos dados e deve ser considerada especialmente quando o conjunto de alternativas é modificado.

O TOPSIS opera com valores numéricos, mas isso não significa que só possa utilizar dados originalmente quantitativos. Avaliações qualitativas podem ser convertidas em escalas numéricas, como ocorreu neste estudo com a utilização de uma escala Likert. Essa conversão facilita o processamento, mas não transforma o julgamento qualitativo em uma medida totalmente objetiva.

2.6 Síntese dos estudos identificados na revisão sistemática

A revisão sistemática da literatura foi utilizada para identificar estudos relacionados às ferramentas da qualidade, à decisão multicritério e à indústria siderúrgica. Nesta seção são apresentados apenas os principais achados e sua relação com o problema de pesquisa. Os procedimentos de busca, incluindo bases consultadas, datas, campos pesquisados, strings, filtros, idiomas, tipos documentais e critérios de inclusão e exclusão, devem ser descritos no Capítulo 3.

As diretrizes PRISMA 2020 foram utilizadas como referência para organizar o relato do processo de identificação, triagem e inclusão dos estudos (Page *et al.*, 2021). O PRISMA constitui uma diretriz de relato para revisões sistemáticas e não deve ser tratado como método autônomo de pesquisa. Sua utilização favorece a transparência sobre o número de registros encontrados, removidos, avaliados e incluídos.

Os estudos identificados sobre ferramentas da qualidade na indústria siderúrgica demonstram aplicações de Pareto, Ishikawa, fluxogramas, DMAIC e VSM em problemas relacionados a estoques, desperdícios, eficiência operacional e desempenho ambiental. Koul, Samantaray *et al.* (2021), por exemplo, utilizaram ferramentas associadas ao DMAIC para analisar fatores relacionados à formação de estoques em uma planta siderúrgica. Saied, Galal e El-Sayed (2019) discutiram a aplicação de ferramentas *Lean* para redução de desperdícios materiais e energéticos. Esses estudos evidenciam a presença de abordagens estruturadas de melhoria, mas não apresentam a mesma integração entre priorização multicritério e Relatório A3 adotada nesta pesquisa.

No campo da decisão multicritério, os estudos identificados demonstram a utilização de métodos MCDM em problemas siderúrgicos, como classificação de materiais, seleção de fornecedores e avaliação de alternativas operacionais. Entretanto, os resultados recuperados pela estratégia de busca adotada não permitem afirmar a inexistência de estudos sobre a integração investigada. O resultado zero de uma string específica significa apenas que não foram identificados documentos naquela combinação de termos, bases e filtros.

A síntese comparativa indica que os estudos de qualidade concentram-se predominantemente na análise e na melhoria de problemas específicos, enquanto os trabalhos multicritério se dedicam à ordenação ou seleção de alternativas. A abordagem proposta

neste trabalho conecta essas duas funções: inicialmente, o TOPSIS estrutura a priorização das anomalias; posteriormente, o Relatório A3 organiza a análise e a proposição de contramedidas para as ocorrências selecionadas.

Assim, a contribuição teórica pretendida não consiste em afirmar uma lacuna absoluta na literatura, mas em explorar uma integração pouco representada entre os estudos identificados na estratégia de busca adotada. Essa formulação reconhece as limitações de cobertura das bases, das strings e dos filtros utilizados e evita generalizações além das evidências recuperadas.

3 Metodologia

Este capítulo apresenta os procedimentos metodológicos utilizados para a realização deste trabalho, descrevendo o enquadramento científico adotado, a identificação e a avaliação das anomalias operacionais, a construção da matriz de decisão, a aplicação do método TOPSIS e a utilização do Relatório A3 para a análise das ocorrências priorizadas e a proposição de contramedidas.

3.1 Classificação da Pesquisa

Esta pesquisa classifica-se, quanto à sua natureza, como aplicada, uma vez que utiliza conhecimentos, métodos e ferramentas da Engenharia de Produção para analisar um problema concreto relacionado à gestão de anomalias operacionais em uma unidade siderúrgica. A pesquisa aplicada busca empregar conhecimentos científicos e técnicos em situações reais, produzindo informações capazes de apoiar a compreensão do problema e a formulação de propostas de melhoria.

Quanto aos objetivos, o estudo apresenta caráter descritivo e normativo. O caráter descritivo está associado ao levantamento, à organização, à caracterização e à avaliação das anomalias operacionais observadas nos setores analisados. Essa etapa contempla a descrição das ocorrências, dos respectivos contextos operacionais e dos possíveis impactos relacionados à segurança, à produção, ao custo, à qualidade, ao meio ambiente e aos fatores humanos.

O caráter normativo decorre da proposição de uma abordagem estruturada para apoiar a priorização das anomalias e a elaboração de propostas de tratamento. Neste trabalho, essa dimensão está relacionada à integração entre o método TOPSIS e o Relatório A3, utilizada para organizar o processo de priorização, aprofundar a análise das ocorrências selecionadas e estruturar propostas de contramedidas, acompanhamento e padronização.

Cabe destacar que não se considera que o TOPSIS forneça uma solução ótima ou definitiva para o problema investigado. O método realiza a ordenação das alternativas

com base na proximidade relativa de cada uma em relação às soluções ideais positiva e negativa. Dessa forma, o resultado corresponde a um ranking construído a partir dos critérios, dos pesos e das avaliações definidas no processo decisório. O TOPSIS atua, portanto, como instrumento de apoio à decisão, contribuindo para tornar a priorização mais sistemática, transparente e rastreável.

A abordagem adotada é combinada, de caráter sequencial, integrando uma etapa quantitativa e uma etapa qualitativa. Na primeira etapa, as anomalias foram avaliadas por especialistas segundo critérios previamente definidos e tratadas por meio do método TOPSIS. As avaliações foram organizadas em uma matriz de decisão, permitindo comparar as ocorrências de forma uniforme e calcular os respectivos coeficientes de proximidade relativa. Como resultado, foi obtido um ranking de criticidade, utilizado para orientar a seleção das anomalias submetidas às análises posteriores.

Na segunda etapa, de natureza predominantemente qualitativa, foram analisados os contextos operacionais das ocorrências mais bem posicionadas no ranking. Para isso, utilizou-se o Relatório A3, associado a diferentes ferramentas da qualidade selecionadas conforme as características de cada caso e os dados disponíveis. Entre as ferramentas empregadas estão o fluxograma, o Diagrama de Ishikawa, o Diagrama de Pareto e os gráficos de controle.

A dimensão qualitativa esteve relacionada à interpretação das evidências, dos registros históricos, das condições dos processos e das percepções técnicas dos profissionais envolvidos. Dessa forma, essa etapa não se restringiu ao preenchimento dos Relatórios A3, mas envolveu a análise dos contextos operacionais, a discussão das causas potenciais e a formulação de contramedidas compatíveis com cada ocorrência.

Quanto ao método, a investigação foi desenvolvida como estudo de caso em uma unidade siderúrgica, abrangendo ocorrências relacionadas ao teleférico, à sinterização e ao circuito de moagem. O estudo de caso mostrou-se adequado por permitir uma análise aprofundada de fenômenos inseridos em seu contexto real, considerando as relações entre equipamentos, processos, registros operacionais e decisões técnicas.

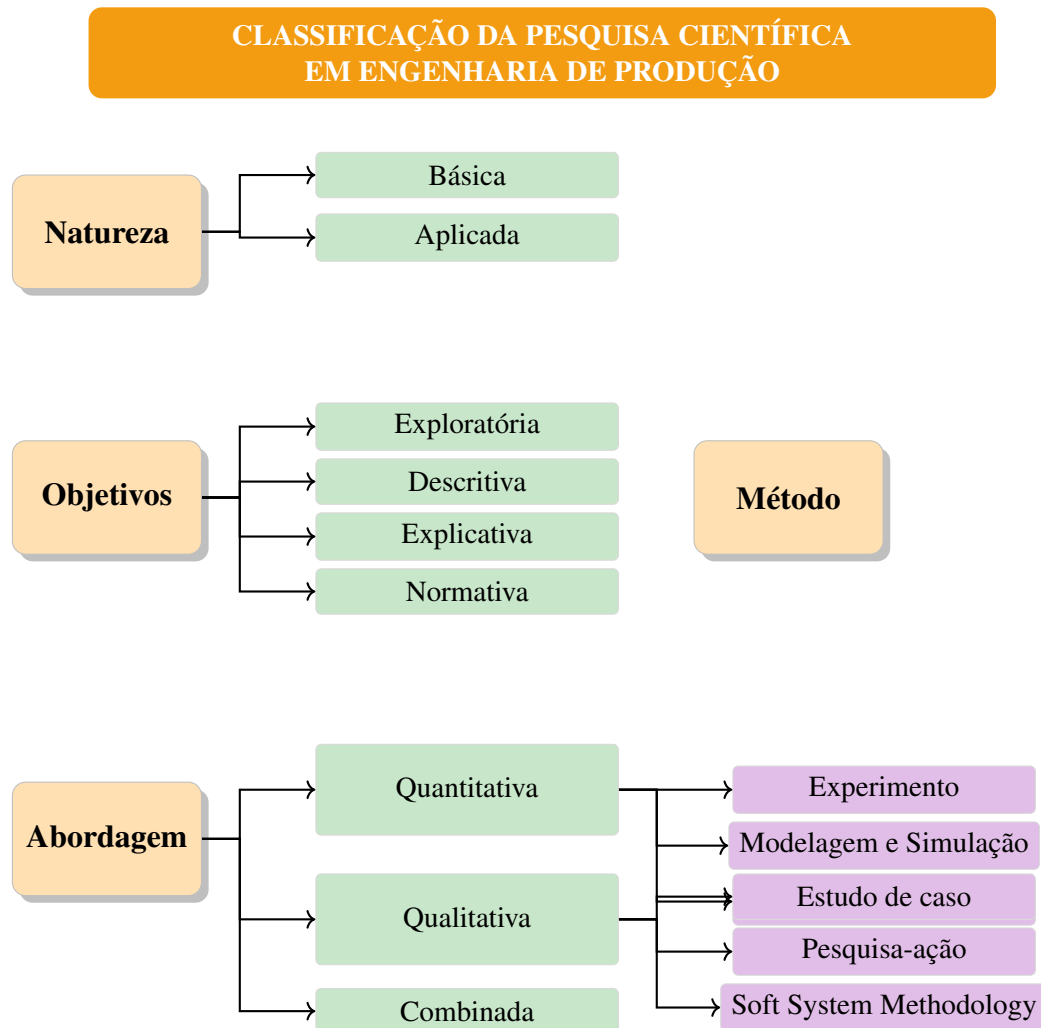
Além do estudo de caso, foi empregada modelagem matemática para representar o problema de decisão multicritério por meio da matriz de decisão, da definição dos critérios e dos pesos e da aplicação do algoritmo TOPSIS. Essa modelagem permitiu

transformar as avaliações dos especialistas em informações organizadas, comparáveis e passíveis de processamento.

Entretanto, não foi realizada simulação computacional de cenários. O estudo não reproduziu dinamicamente o comportamento dos processos industriais nem avaliou cenários futuros por meio de modelos de simulação. Por essa razão, o enquadramento metodológico corresponde especificamente à modelagem do problema de decisão.

De forma integrada, a classificação metodológica evidencia que a pesquisa combina aplicação prática, descrição estruturada, proposição normativa, tratamento quantitativo e interpretação qualitativa. A classificação geral da pesquisa, dentro do escopo da Engenharia de Produção, é apresentada na Figura 6.

Figura 6 – Classificação da pesquisa científica em engenharia de produção



Fonte: Adaptado de [Mello et al. \(2012\)](#).

3.2 Priorização de Problemas (Abordagem Quantitativa)

As anomalias foram identificadas a partir de registros históricos da unidade siderúrgica, incluindo documentos operacionais, históricos de manutenção, relatórios de ocorrências e informações de confiabilidade disponíveis desde 2020. Foram consideradas ocorrências relacionadas aos setores industriais analisados, incluindo teleférico, sinterização e circuito de moagem. Após a retirada de eventos isolados, atípicos ou com informações insuficientes para comparação, foi consolidado um conjunto de 32

anomalias operacionais.

A avaliação foi realizada por um comitê técnico composto por dez profissionais com experiência nas áreas de operação, manutenção, processo e confiabilidade. Participaram três engenheiros de manutenção preventiva, dois supervisores de turno da sinterização, quatro técnicos especialistas de campo das áreas mecânica e elétrica e um coordenador de processos operacionais. As avaliações ocorreram por meio de reuniões de alinhamento técnico, nas quais as anomalias foram apresentadas, discutidas e classificadas com base nos registros históricos e na experiência dos participantes. As notas foram consolidadas após discussão coletiva, buscando obter uma avaliação consensual para cada anomalia em cada critério.

Os critérios selecionados para a avaliação foram Segurança, Produção, Custo, Qualidade, Meio Ambiente e Fatores Humanos. O critério Segurança representa o potencial de impacto sobre a integridade física dos trabalhadores. Produção corresponde à interferência da anomalia na continuidade operacional, na disponibilidade dos equipamentos e no cumprimento das metas. Custo considera impactos diretos e indiretos relacionados à manutenção, reposição de componentes e perdas produtivas. Qualidade avalia possíveis efeitos sobre as especificações do processo ou do produto. Meio Ambiente considera riscos de vazamentos, emissões, resíduos ou outros impactos ambientais. Fatores Humanos abrange esforço físico, ergonomia, carga de trabalho e exposição das equipes durante as intervenções.

Os pesos dos critérios foram definidos por consenso entre os participantes do comitê técnico, considerando a importância relativa de cada dimensão para o contexto operacional estudado. O critério Segurança recebeu o maior peso em razão da prioridade atribuída à proteção dos trabalhadores. Os demais pesos foram discutidos coletivamente e normalizados de modo que sua soma fosse igual a um. A definição dos pesos e das notas incorpora julgamento técnico e, portanto, não elimina a subjetividade. O objetivo do procedimento foi tornar explícitos os critérios utilizados e estruturar quantitativamente a priorização das anomalias.

As avaliações utilizaram uma escala Likert de 1 a 5, em que a nota 1 representou impacto muito baixo, a nota 2 impacto baixo, a nota 3 impacto moderado, a nota 4 impacto alto e a nota 5 impacto crítico. Como valores mais altos representaram maior

impacto ou criticidade, todos os critérios foram tratados como critérios de benefício para fins de priorização.

Para realizar a priorização, foi aplicado o método TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*), que permite ordenar alternativas avaliadas simultaneamente por diferentes critérios. Neste trabalho, as alternativas correspondem às 32 anomalias identificadas, enquanto Segurança, Produção, Custo, Qualidade, Meio Ambiente e Fatores Humanos constituem os critérios de avaliação.

Inicialmente, os dados foram organizados em uma matriz de decisão, na qual as linhas representam as anomalias analisadas e as colunas correspondem aos critérios de avaliação. Cada elemento x_{ij} representa a avaliação atribuída à anomalia i em relação ao critério j , conforme a Equação 3.1.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Nessa representação, m corresponde ao número de alternativas, totalizando 32 anomalias; n representa a quantidade de critérios; e x_{ij} corresponde à avaliação atribuída à anomalia i no critério j . A estrutura da matriz de decisão adotada no estudo é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Estrutura da matriz de decisão

Anomalias	Segurança	Produção	Custo	Qualidade	Meio Ambiente	Fatores Humanos
Anomalia 1	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}
Anomalia 2	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{25}	x_{26}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
Anomalia 32	$x_{32,1}$	$x_{32,2}$	$x_{32,3}$	$x_{32,4}$	$x_{32,5}$	$x_{32,6}$

Após a construção da matriz de decisão, realizou-se a normalização dos valores, de modo a permitir a comparação entre os critérios em uma escala comum. A normalização foi calculada por meio da Equação 3.2.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (3.2)$$

Em que r_{ij} representa o valor normalizado da anomalia i em relação ao critério j . Na sequência, os valores normalizados foram multiplicados pelos respectivos pesos dos critérios, formando a matriz de decisão normalizada e ponderada. Os pesos devem apresentar soma igual a um, conforme a Equação 3.3.

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1 \quad (3.3)$$

A ponderação dos valores normalizados foi realizada conforme a Equação 3.4.

$$v_{ij} = w_j \cdot r_{ij} \quad (3.4)$$

Em que v_{ij} representa o valor normalizado e ponderado da anomalia i no critério j , e w_j corresponde ao peso atribuído ao respectivo critério.

A partir da matriz normalizada e ponderada, foram determinadas a solução ideal positiva e a solução ideal negativa. Como as maiores notas indicam maior criticidade, a solução ideal positiva foi constituída pelos maiores valores de cada coluna, enquanto a solução ideal negativa foi formada pelos menores valores, conforme as Equações 3.5 e 3.6.

$$A^+ = \left\{ \max_i(v_{i1}), \max_i(v_{i2}), \dots, \max_i(v_{in}) \right\} \quad (3.5)$$

$$A^- = \left\{ \min_i(v_{i1}), \min_i(v_{i2}), \dots, \min_i(v_{in}) \right\} \quad (3.6)$$

Posteriormente, foram calculadas as distâncias de cada anomalia em relação às soluções ideais positiva e negativa. A distância em relação à solução ideal positiva foi calculada pela Equação 3.7.

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (3.7)$$

A distância em relação à solução ideal negativa foi calculada pela Equação 3.8.

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (3.8)$$

Em que D_i^+ representa a distância da anomalia i em relação à solução ideal positiva, enquanto D_i^- representa sua distância em relação à solução ideal negativa.

Por fim, calculou-se o coeficiente de proximidade relativa de cada anomalia, conforme a Equação 3.9.

$$CC_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (3.9)$$

O coeficiente de proximidade relativa varia entre zero e um. Neste estudo, quanto mais próximo de um for o valor de CC_i , maior será a criticidade da anomalia, exclusivamente em razão da codificação adotada, na qual notas mais altas representam impactos mais elevados e todos os critérios foram tratados como critérios de benefício.

Os cálculos foram realizados em planilha eletrônica, utilizando fórmulas para a normalização, a ponderação, a definição das soluções ideais, o cálculo das distâncias e a obtenção dos coeficientes de proximidade. Os resultados foram conferidos por meio da verificação dos pesos, das fórmulas e dos valores intermediários.

Após a consolidação dos resultados, as 32 anomalias foram organizadas em ordem decrescente de acordo com os coeficientes de proximidade obtidos. O ranking foi apresentado ao corpo técnico para verificação de sua coerência em relação ao histórico operacional e ao conhecimento dos participantes. Essa validação não eliminou a influência dos julgamentos, mas permitiu verificar possíveis inconsistências na consolidação das avaliações.

As quatro anomalias mais bem posicionadas no ranking foram selecionadas para aprofundamento por meio do Relatório A3. Além da posição obtida no TOPSIS, foi considerada a disponibilidade mínima de registros e evidências necessárias à análise.

As ocorrências selecionadas foram a queda da caçamba do teleférico, o descontrole de umidade das partículas na sinterização, o rompimento dos tirantes de fixação e a parada acidental prolongada no circuito de moagem.

A influência dos pesos sobre o ranking constitui uma limitação metodológica. Como não foi realizada análise de sensibilidade dos pesos, não se afirma que a ordenação permaneceria inalterada diante de diferentes estruturas de ponderação. Essa limitação deve ser considerada na interpretação dos resultados.

3.3 Análise e Solução de Problemas (Abordagem Qualitativa)

A etapa qualitativa foi desenvolvida por meio da elaboração de um Relatório A3 para cada uma das quatro anomalias selecionadas. Os relatórios foram estruturados pelo pesquisador com apoio de informações fornecidas por profissionais das áreas de operação, manutenção, processo e confiabilidade. As informações utilizadas foram obtidas por meio da análise de registros históricos de ocorrências e manutenção, consulta a documentos e procedimentos operacionais, análise de dados de processo e gráficos disponíveis, discussões técnicas com os profissionais envolvidos e informações de campo disponíveis para cada caso.

A análise qualitativa foi realizada pela comparação entre essas diferentes fontes de evidência. As informações documentais foram confrontadas com as percepções dos especialistas e com os dados técnicos de cada ocorrência. Quando não havia evidência suficiente para confirmação, as causas foram tratadas como causas potenciais ou hipóteses causais, evitando-se afirmar que o simples uso de uma ferramenta comprovava a causa-raiz.

Para cada caso, a condição atual foi descrita com base no histórico da ocorrência, na etapa do processo afetada, nos sintomas observados, nos impactos operacionais e nas evidências disponíveis. As ferramentas da qualidade foram selecionadas conforme a natureza e os dados de cada anomalia. O fluxograma foi utilizado para representar a sequência do processo e localizar o ponto de ocorrência da falha. O Diagrama de Ishikawa foi empregado para organizar causas potenciais em categorias. O Diagrama

de Pareto foi utilizado quando havia dados de frequência ou duração que permitiam ordenar fatores. Os gráficos de controle foram empregados quando existiam séries de dados adequadas à análise da estabilidade do processo. Os 5 Porquês foram utilizados para aprofundar relações causais específicas identificadas durante as discussões técnicas.

As contramedidas foram formuladas a partir das causas potenciais consideradas tecnicamente plausíveis e discutidas com os profissionais envolvidos. A definição das propostas considerou sua relação com o problema analisado, a viabilidade técnica, a segurança, a disponibilidade de recursos e a possibilidade de acompanhamento. Quando havia mais de uma possibilidade de ação, a seleção priorizou as alternativas com maior aderência às causas analisadas e melhor viabilidade de implementação.

Os planos de ação foram estruturados por meio do 5W2H, contendo a descrição das ações, suas justificativas, os locais de aplicação, os responsáveis, os prazos, as formas de execução e, quando disponível, a estimativa de recursos ou custos. Como parte das ações não foi integralmente implantada durante o período da pesquisa, não houve verificação longitudinal completa da eficácia. Foram propostas formas de acompanhamento e indicadores para possibilitar avaliação futura pela organização.

Da mesma forma, as medidas de padronização foram apresentadas como propostas de revisão de procedimentos, rotinas de inspeção, critérios de controle, treinamentos e registros. Não se afirma que novos padrões tenham sido efetivamente incorporados à rotina em todos os casos. Essas medidas foram formuladas visando favorecer a sustentação das melhorias após eventual implantação.

Como resultado deste processo, os Relatórios A3 foram disponibilizados à organização como instrumentos de apoio à tomada de decisão e à implementação futura das contramedidas propostas.

4 Desenvolvimento

4.1 Contextualização da Unidade Industrial e dos Processos Analisados

O estudo foi desenvolvido em uma unidade siderúrgica localizada no estado de Minas Gerais, inserida no contexto industrial do Quadrilátero Ferrífero. Para preservar a confidencialidade organizacional, o nome da empresa e informações que permitam sua identificação direta não são apresentados. A contextualização geográfica é utilizada apenas para situar o ambiente industrial no qual os processos analisados estão inseridos, sem pretender generalizar os resultados para todas as unidades siderúrgicas da região.

A unidade analisada possui processos contínuos e interdependentes, nos quais o transporte de matérias-primas, a preparação da carga, a sinterização e a moagem exercem influência sobre a continuidade operacional. Os casos selecionados envolvem o sistema de teleférico, a preparação e o controle da umidade da mistura na sinterização, os tirantes de fixação de estruturas submetidas a variações térmicas e o circuito de moagem. Esses processos foram considerados por apresentarem anomalias registradas nos históricos operacionais e por integrarem o conjunto avaliado pelo comitê técnico.

As condições de operação incluem presença de particulados, umidade, vibração, variações de temperatura e carregamentos mecânicos cíclicos. Esses fatores podem contribuir para desgaste, corrosão, obstruções, falhas de medição e degradação de componentes. Entretanto, não se assume que o ambiente seja a causa primária de todas as anomalias. A relação entre cada ocorrência e seus fatores associados foi analisada individualmente, com base nos dados operacionais e nas verificações conduzidas pelos profissionais das respectivas áreas.

4.2 Avaliação dos Especialistas e Aplicação do Método TOPSIS

A priorização das anomalias foi conduzida por meio do método *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS). O método foi utilizado para estruturar quantitativamente a comparação entre eventos operacionais avaliados segundo critérios de diferentes naturezas. O resultado corresponde a um ranking multicritério condicionado às notas e aos pesos definidos pelo comitê técnico, não devendo ser interpretado como demonstração isolada de urgência, impacto financeiro ou criticidade em um único critério.

4.2.1 Coleta de Dados e Matriz de Decisão

A etapa inicial consistiu no levantamento dos registros históricos de anomalias da unidade siderúrgica a partir de 2020. Em razão do tempo disponível para a pesquisa, o levantamento concentrou-se nas ocorrências de maior recorrência registradas nos processos analisados. Essa delimitação permitiu direcionar o estudo para problemas crônicos, mas deve ser reconhecida como uma limitação, uma vez que eventos raros ou de ocorrência única também podem apresentar elevada gravidade, especialmente sob o critério Segurança.

O conjunto final incluiu anomalias relacionadas ao teleférico, à sinterização e ao circuito de moagem. Portanto, o estudo não foi delimitado exclusivamente à área de Sinterização. Após a organização dos registros e a verificação da disponibilidade de informações para comparação, consolidou-se um inventário com 32 anomalias operacionais.

Cada anomalia foi avaliada segundo seis critérios, utilizando-se uma escala Likert de 1 a 5, na qual 1 representa impacto muito baixo e 5 representa impacto crítico. As avaliações foram realizadas por um comitê técnico composto por dez profissionais atuantes nas áreas de operação, manutenção e confiabilidade: três engenheiros de manutenção preventiva, dois supervisores de turno da Sinterização, quatro técnicos especialistas de campo das áreas mecânica e elétrica e um coordenador de processos operacionais.

As notas não correspondem a médias aritméticas de avaliações individuais. Cada anomalia foi discutida coletivamente, considerando os registros históricos, os dados

disponíveis e a experiência dos participantes, até que fosse definida uma nota consensual para cada critério. Por esse motivo, os 192 valores apresentados na matriz são números inteiros. O procedimento não elimina a subjetividade, mas torna explícitos os julgamentos utilizados e permite que todas as alternativas sejam comparadas por uma estrutura comum. Após a consolidação da matriz, o conjunto de notas foi validado pelo comitê técnico quanto à coerência com o histórico operacional.

A Tabela 2 apresenta a Matriz de Decisão consolidada, formada pelas notas consensuais atribuídas pelo comitê técnico.

Tabela 2 – Matriz de Decisão Consolidada (Escala Likert 1-5)

Evento Operacional (Alternativas)	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Parada da Sinterização por desligamento do CT 101	4	2	4	2	2	2
Parada de Máquina por elevação da Temp. do precipitador	4	2	4	3	4	3
Aporte de efluentes do DRC para o Rio Piracicaba	2	2	5	1	5	4
Parada da Sinterização para trocar peneira E3031	4	2	3	4	1	3
Parada da sinterização para troca da peneira (quebra)	5	3	3	3	1	3
Parada acidental da Máquina de Sínter (> 60 min)	4	2	3	2	1	2
Parada acidental da Sinterização (> 60 min)	4	3	3	3	1	2
Parada do Teleférico (> 180 min)	4	2	3	2	1	2
Máquina de Sinter parada (inundação das bombas)	5	4	5	3	4	4
Parada da Máquina de Sínter (Sobrecarga CT E7001)	4	3	3	3	1	2
Parada da Máquina de Sínter (falta de caminhão)	4	2	3	3	1	3
Parada da Máquina de Sínter (travamento da CTE7001)	5	3	4	3	1	3
Falha no cabeçote móvel do silo de cal (vazamento)	4	4	4	5	3	4
Parada da Máquina de sínter (queima de gás)	4	5	4	3	4	4
Contaminação de carga mineral no silo de coque	3	2	4	5	1	3

Continua na próxima página

Tabela 2 – Continuação da página anterior

Evento Operacional	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Engaiolamento de síter no chute do Britador	4	3	4	2	1	3
Parada Acidental do Teleférico (Queda da Caçamba)	4	5	5	2	1	5
Falta de falsa grelha para forramento na Máquina	4	2	3	5	1	3
Parada por rompimento dos tirantes do Forno de Ignição	4	4	4	3	1	4
Parada para limpeza geral da Sinterização	3	1	3	2	1	2
Parada da Máquina por sensor de expansão atuado	4	2	3	2	1	2
Parada da Máquina por corrente alta	4	3	3	2	1	2
Parada 60 min (nível baixo nos silos do HPS)	5	2	3	3	1	2
Parada 60 min (sensor de expansão atuado)	5	2	4	3	1	3
Parada por material não conforme nos discos de pelotização	4	2	3	5	1	3
Parada por nível alto na calha E6002	4	2	3	2	1	2
Parada por retirada de material não conforme (entupimento)	4	3	4	5	1	3
Descarga de poeira do Precipitador acima do limite	2	2	4	3	5	3
Parada por descontrole de umidade e temperatura	4	3	3	5	1	3
Descontrole de processo na Sinterização	4	2	3	4	1	3
Falha na dosagem de Combustível na Sinterização	4	3	4	5	2	3
Parada Acidental de Moagem (> 120 min)	5	4	5	2	1	4

4.2.2 Ponderação e Ranqueamento Final

Após a estruturação da matriz, os critérios foram ponderados conforme decisão consensual do comitê técnico. Os pesos adotados foram Segurança (35%), Produção (15%), Custo (15%), Meio Ambiente (15%), Qualidade (10%) e Fatores Humanos (10%). A Segurança recebeu o maior peso em razão da prioridade organizacional atribuída à proteção dos trabalhadores. Produção, Custo e Meio Ambiente receberam pesos iguais por terem sido considerados dimensões de relevância intermediária no contexto analisado, enquanto Qualidade e Fatores Humanos receberam pesos de 10%.

Os valores não foram obtidos por um método formal de elicitação, como AHP, *swing weighting* ou ROC, mas por discussão e consenso do comitê técnico. Assim, a ponderação representa as preferências do grupo participante e deve ser interpretada como uma escolha contextual. Não foi realizada análise de sensibilidade dos pesos. Essa ausência constitui uma limitação, especialmente em razão da proximidade entre os coeficientes das alternativas classificadas entre a terceira e a sétima posições, pois pequenas alterações na ponderação poderiam modificar a composição do Top 4.

O desenvolvimento do método seguiu rigorosamente o formalismo matemático e a ordem lógica das equações apresentadas na seção metodológica. Inicialmente, realizou-se a normalização vetorial e a ponderação dos dados da matriz de decisão. Na etapa subsequente, determinaram-se os vetores da Solução Ideal Positiva (A^+) e da Solução Ideal Negativa (A^-) para cada um dos seis critérios em análise.

A partir desses limites ideais, calculou-se a medida de separação euclidiana de cada alternativa, resultando nos valores absolutos de distância de aproximação (D_i^+) e de afastamento (D_i^-). Como passo final do algoritmo, calculou-se a proporção exata expressa pelo Coeficiente de Proximidade Relativa (CC_i), o que permitiu o ranqueamento decrescente de criticidade de todo o inventário. Esta sequência rigorosa garante que os leitores não familiarizados com o método compreendam a evolução do tratamento analítico.

Para fins de transparência metodológica e permitir uma análise detalhada de todas as etapas pós-processamento do método TOPSIS, os dados de todo o inventário foram desmembrados de forma completa. A Tabela 3 apresenta as medidas de distância de cada um dos 32 eventos em relação às soluções ideais positiva (D_i^+) e negativa (D_i^-). Na sequência, a Tabela 4 consolida o cálculo do coeficiente final e a determinação da ordem hierárquica completa de criticidade.

Tabela 3 – Medidas de distância de aproximação (D_i^+) e afastamento (D_i^-) das soluções ideais.

Evento Operacional	D_i^+	D_i^-
Parada do teleférico após queda da caçamba 32	0,050	0,092
Parada de sinter por descontrole de umidade das partículas	0,065	0,104

Tabela 3 – Continuação

Evento Operacional	D_i^+	D_i^-
Parada da Sinterização por rompimento dos tirantes de fixação	0,048	0,070
Parada acidental da moagem acima de 120 minutos	0,051	0,072
Falha no silo da Cal (vazamento da tubulação)	0,064	0,081
Parada da Máquina por Elevação de Temp. do PE Primário	0,067	0,085
Máquina de Sinter parada de 21h (15/01) às 16h (16/01)	0,072	0,088
Parada da Sinterização de 14h às 21:27h para manutenção	0,053	0,048
Parada da máquina de sinter por sobrecarga na CT E7001	0,054	0,048
Parada da máquina de sinter por travamento da CTE7001	0,059	0,051
Parada acidental da Sinterização com tempo > 60 min	0,059	0,051
Parada acidental da Máquina de Sinter maior de 60 min	0,059	0,051
Parada da Sinterização para troca da peneira E3031	0,060	0,053
Parada de Máquina de Sinter por descontrole de umidade	0,060	0,052
Falha na dosagem de Combustível na Sinterização	0,067	0,057
Parada por retirada de sinter não conforme	0,063	0,053
Engaiolamento de sinter no chute do Britador E7003	0,058	0,049
Resultados do monitoramento contínuo do PE Primário	0,101	0,069
Aporte de efluentes do DRC para o Rio Piracicaba	0,103	0,070
Parada da Sinterização por desligamento do forno	0,078	0,037

Tabela 3 – Continuação

Evento Operacional	D_i^+	D_i^-
Parada da Máquina de Sinter devido material não conforme	0,077	0,036
Falta de falsa grelha para forramento na máquina	0,077	0,036
Parada > 60 minutos por nível baixo nos silos do HPS	0,073	0,033
Parada da Máquina de Sinter (> 60') por Sensor de Expansão	0,076	0,035
Parada do teleférico maior que 180 min	0,066	0,029
Descontrole de processo na Sinterização	0,076	0,033
Contaminação de carvão mineral no silo 03 de coque	0,080	0,035
Parada por nível alto nos silos de TP e falta de caminhão	0,074	0,031
Parada da Sinterização para trocar peneira E-3031	0,073	0,030
Ocorrência de parada da dosagem de RI	0,073	0,030
Parada da Máquina por sensor de expansão atuado	0,072	0,029
Parada para limpeza geral da Sinterização	0,106	0,015

A partir das medidas de aproximação à solução ideal positiva (D_i^+) e de afastamento da solução ideal negativa (D_i^-), apresentadas na Tabela 3, foi calculado o coeficiente de proximidade relativa (CC_i) de cada evento operacional. Esse coeficiente sintetiza o desempenho das alternativas em relação ao conjunto de critérios analisados, permitindo compará-las e ordená-las de acordo com sua criticidade. Assim, quanto maior o valor de CC_i , maior a proximidade do evento em relação à solução ideal positiva e, consequentemente, maior sua prioridade. A ordenação obtida é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Ordenação hierárquica e coeficientes de proximidade relativa (CC_i).

Pos.	Evento Operacional	Coeficiente (CC_i)
1º	Parada do teleférico após queda da caçamba	0,650

Tabela 4 – Continuação

Pos.	Evento Operacional	Coefficiente (CC_i)
2º	Parada de sinter por descontrole de umidade das partículas	0,613
3º	Parada da Sinterização por rompimento dos tirantes de fixação	0,594
4º	Parada acidental da moagem acima de 120 minutos	0,586
5º	Falha no silo da Cal (vazamento da tubulação)	0,560
6º	Parada da Máquina por Elevação de Temp. do PE Primário	0,560
7º	Máquina de Sinter parada de 21h (15/01) às 16h (16/01)	0,550
8º	Parada da Sinterização de 14h às 21:27h para manutenção	0,472
9º	Parada da máquina de sinter por sobrecarga na CT E7001	0,471
10º	Parada da máquina de sinter por travamento da CTE7001	0,466
11º	Parada acidental da Sinterização com tempo > 60 min	0,466
12º	Parada acidental da Máquina de Sinter maior de 60 min	0,466
13º	Parada da Sinterização para troca da peneira E3031	0,466
14º	Parada de Máquina de Sinter por descontrole de umidade	0,465
15º	Falha na dosagem de Combustível na Sinterização	0,462
16º	Parada por retirada de sinter não conforme	0,456
17º	Engaiolamento de sinter no chute do Britador E7003	0,456
18º	Resultados do monitoramento contínuo do PE Primário	0,406

Tabela 4 – Continuação

Pos.	Evento Operacional	Coefficiente (CC_i)
19°	Aporte de efluentes do DRC para o Rio Piracicaba	0,404
20°	Parada da Sinterização por desligamento do forno 014	0,322
21°	Parada da Máquina de Sinter devido material não conforme	0,316
22°	Falta de falsa grelha para forramento na máquina	0,316
23°	Parada > 60 minutos por nível baixo nos silos do HPS	0,315
24°	Parada da Máquina de Sinter (> 60') por Sensor de Expansão	0,312
25°	Parada do teleférico maior que 180 min	0,304
26°	Descontrole de processo na Sinterização	0,303
27°	Contaminação de carvão mineral no silo 03 de coque	0,302
28°	Parada por nível alto nos silos de TP e falta de caminhão	0,293
29°	Parada da Sinterização para trocar peneira E-3031	0,292
30°	Ocorrência de parada da dosagem de RI	0,292
31°	Parada da Máquina por sensor de expansão atuado	0,285
32°	Parada para limpeza geral da Sinterização	0,126

4.2.3 Análise do Resultado e Seleção do Projeto

A Tabela 5 apresenta, de forma resumida, as quatro anomalias mais bem posicionadas no ranking. A seleção de quatro casos não decorreu de um corte matemático, estatístico ou de um limiar específico do coeficiente de proximidade. Foram escolhidas as quatro primeiras alternativas do ranking em razão da limitação temporal da pesquisa e da disponibilidade de dados para o aprofundamento das análises. O resultado foi apresentado

ao comitê técnico, que confirmou sua coerência com os registros e com o conhecimento operacional dos processos.

Tabela 5 – Ranking de Criticidade (Top 4 identificados pelo TOPSIS)

Posição	Evento Operacional	Coefficiente (CC_i)
1º	Parada Acidental do Teleférico após Queda da Caçamba	0,650
2º	Parada da Máquina de Sínter após descontrole de umidade	0,613
3º	Parada da Sinterização após rompimento dos tirantes	0,594
4º	Parada Acidental da Moagem (> 120 min)	0,586

O evento referente à queda da caçamba do teleférico ocupou a primeira posição, com $CC_i = 0,650$. Esse resultado indica o melhor desempenho global segundo o conjunto de critérios e pesos adotados. O ranking não permite afirmar, isoladamente, que o evento seja o principal detrator da confiabilidade, o de maior impacto financeiro ou o mais urgente, pois essas conclusões exigiriam análises específicas de cada dimensão.

4.3 Aplicação do Relatório A3 nas Falhas Operacionais Críticas

Com base no ranking obtido pelo TOPSIS, foram elaborados Relatórios A3 para as quatro anomalias mais bem posicionadas. A queda da caçamba foi o único caso em que parte das ações foi efetivamente implementada durante o período da pesquisa. Nos casos de descontrole de umidade, rompimento dos tirantes e parada prolongada da moagem, os Relatórios A3 apresentam propostas de contramedidas, planos de ação e formas de acompanhamento, sem comprovação de implantação ou eficácia.

As causas associadas a cada ocorrência foram examinadas por profissionais das respectivas áreas, com base em registros históricos, dados operacionais e verificações técnicas específicas. As ferramentas da qualidade foram utilizadas para organizar e interpretar as evidências, não sendo consideradas, isoladamente, suficientes para comprovar relações causais.

4.3.1 Caso do Teleférico: Queda da Caçamba

O sistema de teleférico industrial desempenha um papel crítico no transporte contínuo de matéria-prima e na segurança operacional da planta. O caso em estudo aborda uma falha operacional de elevada gravidade nesse ativo: o desprendimento e a queda da caçamba nº 32. Esse evento paralisou o fluxo logístico de minério, gerou danos estruturais significativos, expôs a área a um elevado risco de acidentes severos e ativou instantaneamente o intertravamento elétrico de emergência, provocando o travamento do cabo de tração.

Diante da gravidade da ocorrência e da necessidade de evitar reincidências, a equipe de engenharia aplicou a metodologia do Relatório A3, fundamentada nos princípios do *Lean Manufacturing*. A ferramenta permitiu estruturar a análise do problema em uma visão sistêmica, desde o mapeamento da falha e de sua causa potencial até a formulação de um plano de ação estruturado.

Inicialmente, analisou-se o contexto e a justificativa da ocorrência, estabelecendo-se a importância fundamental do sistema afetado para a continuidade do negócio. O teleférico industrial é classificado como um equipamento vital para o transporte contínuo de matéria-prima. A priorização e a dedicação de recursos a esse caso específico não foram definidas de maneira empírica, mas fundamentadas na aplicação do método TOPSIS, uma técnica de tomada de decisão multicritério. Esse método classificou o desprendimento da caçamba como o evento mais bem posicionado no ranking multicritério, considerando conjuntamente os critérios e os pesos adotados.

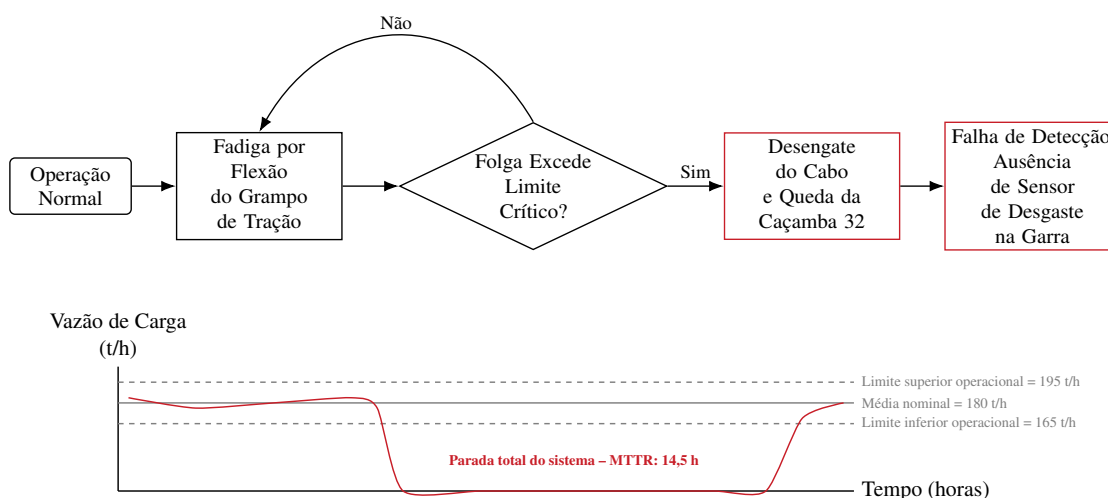
Em seguida, foi avaliada a condição atual do sistema e os impactos provocados pela falha. O evento central consistiu no desprendimento imprevisto, seguido da queda física da caçamba nº 32 da linha de transporte. Como medida de autoproteção do equipamento, ocorreu o travamento instantâneo do cabo de tração por meio da atuação do intertravamento elétrico de emergência. A partir da análise do relatório, foram identificados como impactos diretos a interrupção total e abrupta do fornecimento de insumos para a planta a jusante, a consequente paralisação da produção, os danos estruturais severos na própria caçamba e na blindagem da torre de sustentação, além da geração de um elevado risco de acidentes devido à possibilidade de projeção de carga sobre as vias de tráfego inferiores. Para quantificar a ineficiência provocada pela falha, estabeleceu-se

como métrica de referência o Tempo Médio de Reparo (MTTR), que foi medido em 14,5 horas, valor considerado incompatível com a criticidade do ativo.

Posteriormente, foram definidos os objetivos e as metas da intervenção. Com o problema devidamente compreendido e dimensionado, o documento projetou o cenário ideal e estabeleceu indicadores numéricos para orientar a avaliação dos resultados. O objetivo qualitativo delineado foi favorecer um acoplamento 100% rígido e seguro das caçambas nas garras do cabo, restabelecendo a confiabilidade operacional do teleférico. Do ponto de vista quantitativo, a principal meta estipulada pela equipe foi reduzir para zero o tempo de parada não programada decorrente desse tipo de evento ao longo do ano, sendo essa uma meta de desempenho e não um resultado garantido. Ademais, como meta de produção secundária associada à estabilidade da máquina, definiu-se o retorno do volume de transporte à sua faixa nominal e estável de 180 t/h.

Na sequência, realizou-se a análise da causa potencial, considerada o núcleo analítico do Relatório A3. Nessa etapa, foram utilizadas duas ferramentas complementares: o fluxograma da falha mecânica e o gráfico do comportamento da vazão de carga. Inicialmente, o fluxograma foi empregado para representar de forma lógica e sequencial o desenvolvimento da ocorrência, partindo da condição de operação normal do sistema e avançando para a identificação da fadiga por flexão do grampo de tração. Em seguida, verifica-se se a folga existente no componente excede o limite crítico estabelecido. Caso a resposta seja negativa, o sistema retorna à condição anterior de acompanhamento da fadiga do grampo. Entretanto, quando a folga ultrapassa o limite crítico, ocorre o desengate do cabo e, conseqüentemente, a queda da caçamba nº 32. O fluxo indica que o mecanismo físico esteve associado à fadiga por flexão, ao desgaste progressivo e ao aumento da folga do grampo. A inexistência de um sensor de desgaste foi classificada como uma falha da barreira de detecção, pois não produziu a degradação mecânica, mas dificultou sua identificação antecipada, conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Fluxograma da falha mecânica e gráfico do comportamento da vazão de carga



Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, de forma complementar, a equipe analisou o comportamento histórico da vazão para analisar o comportamento da vazão de carga ao longo do tempo. Essa ferramenta demonstrou que o processo operava na faixa operacional de referência, com média nominal de 180 t/h, limite superior operacional de 195 t/h e limite inferior operacional de 165 t/h, até o instante em que ocorreu uma queda abrupta da vazão para zero. Esse comportamento evidenciou a parada total do sistema, que permaneceu interrompido durante 14,5 horas, valor que corroborou diretamente a métrica de MTTR levantada anteriormente. Após esse período, a curva demonstrou a retomada gradual da vazão até a faixa nominal de operação. Desse modo, a utilização conjunta do fluxograma e do gráfico de controle permitiu associar a evidência operacional da interrupção total do sistema à sequência mecânica da falha, permitindo relacionar a interrupção do transporte à sequência mecânica verificada pelos profissionais da área. A fadiga e o desgaste foram associados ao mecanismo físico da falha, enquanto a ausência de monitoramento automatizado foi interpretada como deficiência de detecção antecipada.

Além disso, após a identificação da causa potencial, foram propostas contramedidas voltadas à eliminação do desgaste mecânico oculto e à implantação de mecanismos de monitoramento. O direcionamento estratégico foi dividido em três frentes de atuação. A primeira correspondeu a um *upgrade* tecnológico, baseado na instalação de sensores

ópticos digitais de contraprova mecânica e de leitores a laser para a verificação, em tempo real, do fechamento das garras. A segunda frente concentrou-se na segurança ativa, prevendo o redesenho dos batentes de proteção e a instalação de redes de retenção dinâmica sob os vãos críticos. Por sua vez, a terceira frente esteve relacionada à recuperação física do sistema, determinando a substituição integral da caçamba nº 32 e, de forma preventiva, a troca de todos os grampos metálicos pertencentes à mesma série histórica, reduzindo a exposição a componentes com histórico semelhante de operação.

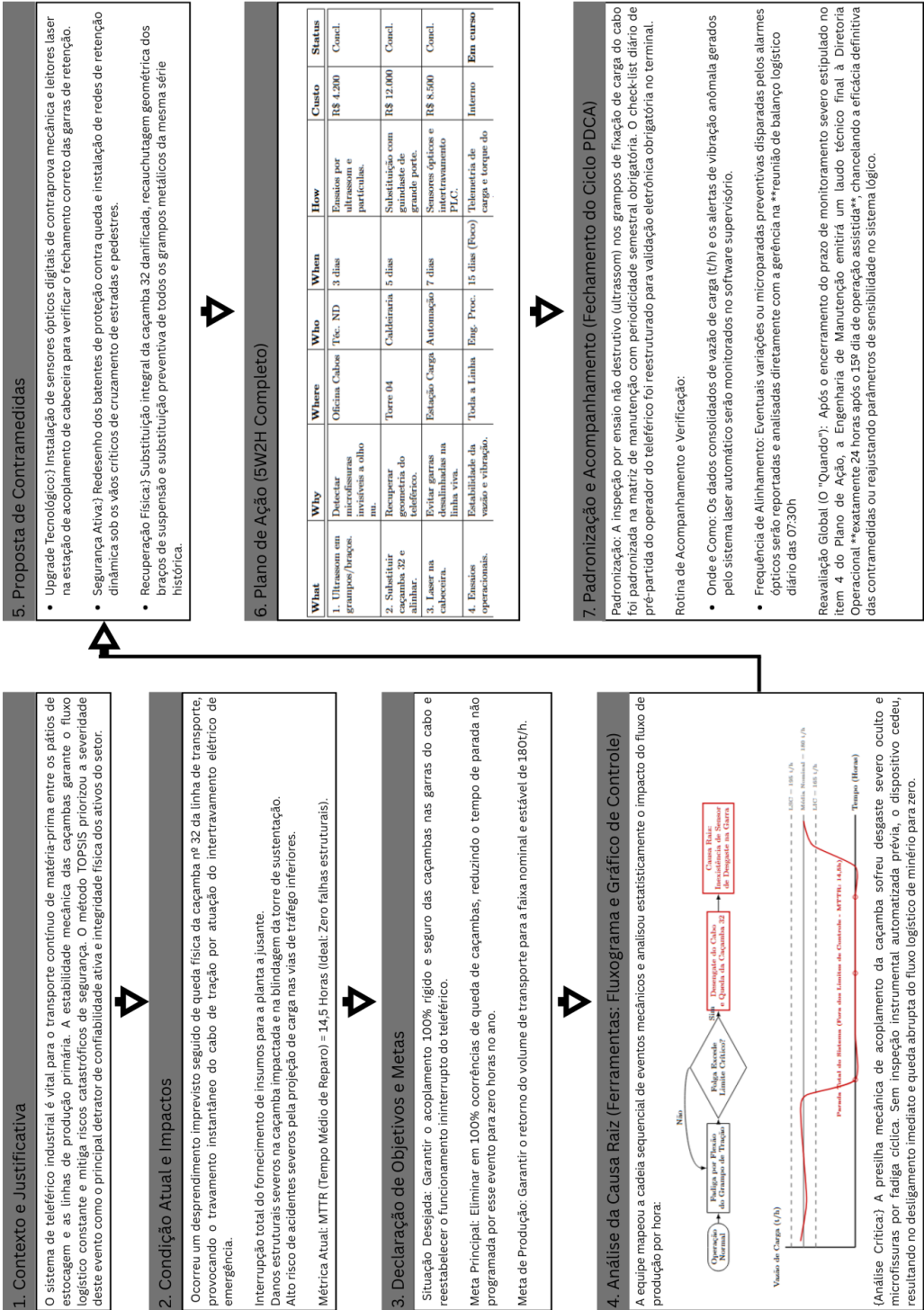
Assim, as contramedidas foram convertidas em um plano de ação prático por meio da ferramenta 5W2H, representada em uma matriz gerencial detalhada. A primeira frente de trabalho consistiu na realização de ensaios por ultrassom nos grampos e braços do sistema, na Oficina de Cabos, sob responsabilidade de um Técnico de Ensaios Não Destrutivos, com duração de três dias e custo de R\$ 4.200,00, tendo sido concluída. A segunda ação correspondeu à substituição da caçamba nº 32 na Torre 04 pela equipe de Caldeiraria, exigindo cinco dias de utilização de um guindaste de grande porte, ao custo de R\$ 12.000,00, também concluída. A terceira ação envolveu a instalação do sistema a laser na cabeceira do teleférico pela equipe de Automação, com duração de sete dias e custo de R\$ 8.500,00, igualmente concluída. Por fim, foram programados ensaios operacionais de telemetria em toda a linha, conduzidos pela Engenharia de Processos durante 15 dias, utilizando recursos internos e apresentando, no momento da elaboração do relatório, o status “Em curso”.

Por fim, foram estabelecidas medidas de padronização e acompanhamento com o propósito de auditar as melhorias implantadas e apoiar o acompanhamento das ações propostas, correspondente às etapas *Plan*, *Do*, *Check* e *Act*. Para consolidar o novo padrão operacional, a inspeção não destrutiva por ultrassom foi formalmente inserida na matriz de manutenção com periodicidade semestral obrigatória. Ademais, o *checklist* do operador foi reestruturado para exigir a validação eletrônica antes da partida do equipamento. Em relação ao monitoramento contínuo, os dados de vazão, expressos em t/h, e os alertas emitidos pelo sistema a laser para a identificação de vibrações anômalas passaram a ser acompanhados por meio de um *software* supervisor, com eventuais desvios tratados diariamente, às 07h30, em conjunto com a gerência. O documento também estabeleceu uma reavaliação técnica global, determinando que um laudo final seja emitido pela Engenharia de Manutenção 24 horas após o 15º dia de operação

assistida, com o objetivo de avaliar o desempenho inicial do novo arranjo ou reajustar os parâmetros considerados sensíveis.

O Relatório A3 encontra-se apresentado na página seguinte para verificação, conforme a Figura 8.

Figura 8 – A3 da queda da caçamba



4.3.2 Caso da Sinterização: Descontrole de Umidade das Partículas

A operação estável da máquina de sinterização é um fator relevante para a eficiência global da planta, sendo fortemente dependente da preparação adequada da mistura crua. Nesse contexto, a umidade das micropartículas atua como uma variável crítica para favorecer a permeabilidade ideal do leito de sinterização e a máxima eficiência na queima do combustível sólido, o coque. O presente estudo aborda um problema crônico nesse processo: a instabilidade no laço automático de adição de água. Esse desvio não apenas compromete a produtividade física do equipamento, mas também eleva significativamente o consumo específico de energia.

Inicialmente, analisaram-se o contexto e a justificativa da ocorrência, estabelecendo-se a influência direta da umidade sobre a permeabilidade da mistura e a eficiência da queima do coque. A priorização desse desvio não foi realizada apenas de forma empírica, mas fundamentada na aplicação do método TOPSIS, uma técnica de tomada de decisão multicritério. A partir da aplicação do método, o problema foi classificado como o segunda posição no ranking multicritério, considerando conjuntamente os critérios e pesos adotados.

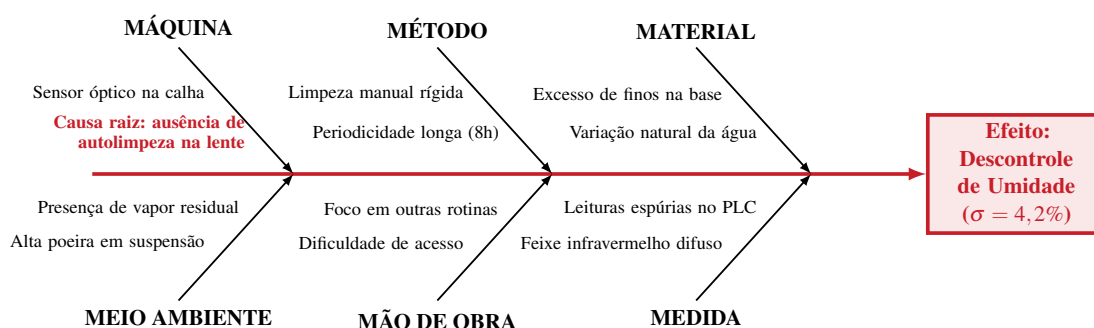
Em seguida, foram avaliadas a condição atual do sistema e as consequências provocadas pelo descontrole da umidade. O laço de controle automático operava de maneira instável, fazendo com que o processo oscilasse entre ciclos de mistura excessivamente seca, condição que aumentava a geração de finos retornados, e ciclos de mistura excessivamente úmida, responsáveis pela redução da taxa de queima. Como impactos diretos, observaram-se uma elevada variabilidade na saída do tambor misturador, sucessivas alterações na velocidade da máquina para compensar os desvios e a degradação da qualidade mecânica do sinter produzido. Para mensurar a instabilidade do processo, adotou-se como indicador o desvio padrão da umidade (σ), medido em 4,2%, valor significativamente superior ao valor de referência operacional, estabelecido em menos de 1,2%.

Posteriormente, foram definidos os objetivos e as metas da intervenção. A partir da consolidação do diagnóstico, definiu-se como condição desejada a obtenção de uma leitura contínua, linear e confiável da umidade em tempo real, permitindo a estabilização adequada do laço PID responsável pela adição de água. Do ponto de vista quantitativo, a

principal meta estipulada pela equipe foi reduzir o desvio padrão da umidade (σ) para um valor inferior a 1,2%. Ademais, foi proposto que essa estabilidade deveria ser mantida durante todo o turno operacional, evitando novas oscilações capazes de comprometer a produtividade e a qualidade do processo.

Na sequência, realizou-se a análise das causas potenciais, utilizando-se o Diagrama de Ishikawa baseado na abordagem dos 6M. Essa ferramenta permitiu organizar e avaliar as possíveis causas associadas à mão de obra, ao método, à máquina, ao material, ao meio ambiente e à medição, conforme apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Diagrama de Ishikawa aplicado ao descontrole de umidade das partículas



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir desse mapeamento, verificou-se que fatores ambientais, especialmente a elevada concentração de poeira em suspensão e a presença de vapor residual, interferiam diretamente no funcionamento do sensor óptico instalado na calha. Além disso, foram identificadas falhas relacionadas ao método de manutenção, uma vez que as limpezas eram realizadas manualmente, apresentavam baixa eficácia e ocorriam em intervalos prolongados de oito horas. A combinação desses fatores provocava o bloqueio do feixe infravermelho e comprometia a precisão da medição. Após a organização das hipóteses pelo Ishikawa, os profissionais da área verificaram o estado do sensor, o histórico das leituras e as condições de limpeza. Com base nessas evidências, a ausência de um sistema de autolimpeza foi considerada a principal causa potencial associada às leituras difusas e espúrias encaminhadas ao Controlador Lógico Programável (PLC). O diagrama, isoladamente, não foi utilizado como comprovação causal.

Além disso, após a identificação da causa potencial, foram propostas contramedidas.

das direcionadas à proteção do instrumento, à prevenção do acúmulo de contaminantes e à melhoria do tratamento lógico dos sinais. O direcionamento estratégico foi dividido em três frentes complementares. A primeira correspondeu à proteção física, com o desenvolvimento de um invólucro pressurizado para abrigar o sensor e reduzir sua exposição direta à poeira e ao vapor. A segunda frente concentrou-se na automação preventiva, propondo a instalação de uma linha dedicada de ar comprimido com bicos direcionados para realizar a varredura e o sopro contínuo da lente. Por sua vez, a terceira frente esteve relacionada ao ajuste lógico do sistema, determinando a revisão dos algoritmos de controle e a inclusão de filtros de atenuação de ruído no PLC, de modo a descartar leituras transientes e reduzir a influência de sinais inconsistentes sobre o processo.

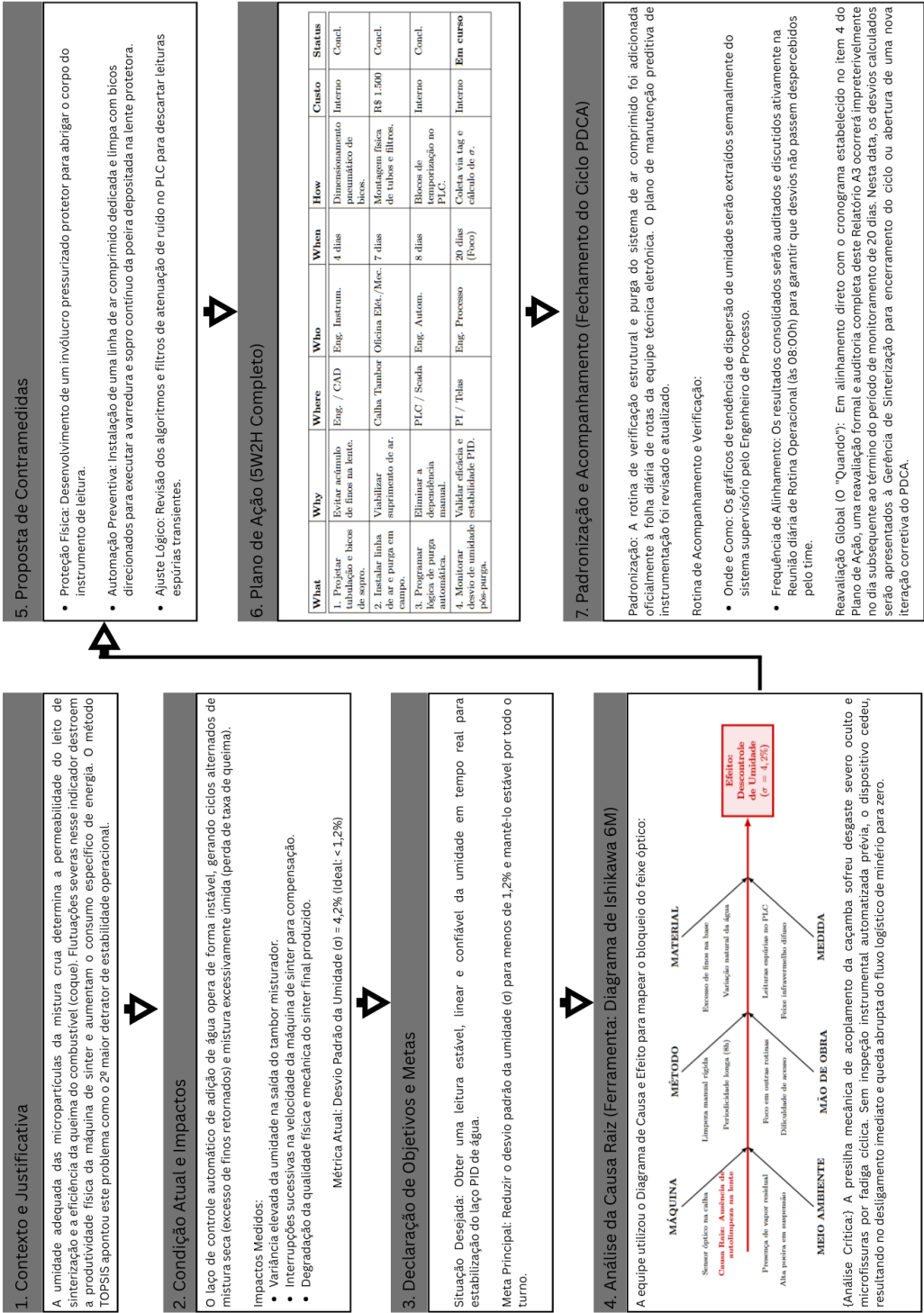
Assim, as contramedidas foram organizadas em um plano de ação proposto por meio da ferramenta 5W2H, estruturada em quatro etapas gerenciais. A primeira etapa envolveu o projeto e o dimensionamento da tubulação e dos bicos de ar comprimido, sob responsabilidade da Engenharia de Instrumentação, com duração prevista de quatro dias e utilização de recursos internos. Em seguida, a segunda etapa correspondeu à montagem física da linha de ar na calha do tambor, executada pela Oficina Eletromecânica com duração prevista de sete dias e custo estimado de R\$ 1.500,00. A terceira etapa consistiu na programação dos blocos de temporização no PLC/SCADA pela equipe de Automação, substituindo a dependência exclusiva da limpeza manual por uma rotina automatizada. Para essa atividade, estimou-se duração de oito dias, com utilização de recursos internos. Por fim, a quarta etapa compreendeu o monitoramento do desvio da umidade por meio das *tags* do sistema PI, sob responsabilidade da Engenharia de Processo, durante um período de 20 dias, previsto para ocorrer após eventual implantação das contramedidas.

Por fim, foram estabelecidas medidas de padronização e acompanhamento com o objetivo de orientar o acompanhamento das melhorias propostas e apoiar o acompanhamento das ações propostas, correspondente às etapas *Plan*, *Do*, *Check* e *Act*. Como novo padrão operacional, propôs-se incorporar a rotina de purga do ar comprimido à folha diária da equipe de manutenção eletrônica, e propôs-se atualizar o plano de manutenção preditiva para contemplar a verificação periódica do sistema. Ademais, foi proposto que os gráficos de dispersão da umidade fossem extraídos semanalmente e auditados durante a Reunião de Rotina Operacional, realizada diariamente às 08h00. O documento também estabeleceu a realização de uma auditoria completa e de uma reavaliação global

do Relatório A3 no dia seguinte ao encerramento dos 20 dias de monitoramento assistido, com a finalidade de avaliar futuramente a eficácia das ações, caso sejam implantadas e, caso necessário, promover ajustes nos parâmetros do sistema.

O Relatório A3 referente à anomalia de descontrole de umidade das partículas na sinterização encontra-se apresentado na página seguinte para verificação, conforme a Figura 10.

Figura 10 – A3 do descontrol de umidade na sinterização



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.3 Caso da Sinterização: Rompimento dos Tirantes de Fixação

A grelha e as estruturas de suporte da máquina de sinterização operam sob condições extremas e contínuas de choque térmico e carregamento cíclico agressivo. Nesse cenário, os tirantes de fixação atuam como componentes críticos, sendo responsáveis por manter o alinhamento mecânico estrutural e favorecer a vedação do sistema contra falsas entradas de ar. O presente estudo analisa uma falha de elevada gravidade nesses componentes, a qual comprometeu severamente a estabilidade do processo e exigiu uma intervenção imediata das equipes responsáveis.

Diante da gravidade da ocorrência e da necessidade de desenvolver uma proposta de solução capaz de suportar o regime térmico do equipamento, a equipe de engenharia e confiabilidade aplicou a metodologia do Relatório A3. A ferramenta possibilitou estruturar a investigação do problema de maneira sistêmica, abrangendo desde a caracterização da falha e a análise de suas causas potenciais até a definição das contramedidas, do plano de ação e das medidas de acompanhamento.

Inicialmente, analisaram-se o contexto e a justificativa da ocorrência, considerando-se a importância da integridade dos tirantes para a operação segura da máquina de sinterização em condições de alta temperatura. Esses componentes exercem uma função essencial na manutenção do alinhamento mecânico e na preservação da vedação do sistema. A priorização da falha não foi realizada apenas de maneira empírica, mas fundamentada na aplicação do método TOPSIS, uma técnica de tomada de decisão multicritério. A partir dessa análise, o rompimento dos tirantes foi classificado como o terceira posição no ranking multicritério, considerando conjuntamente os critérios e pesos adotados.

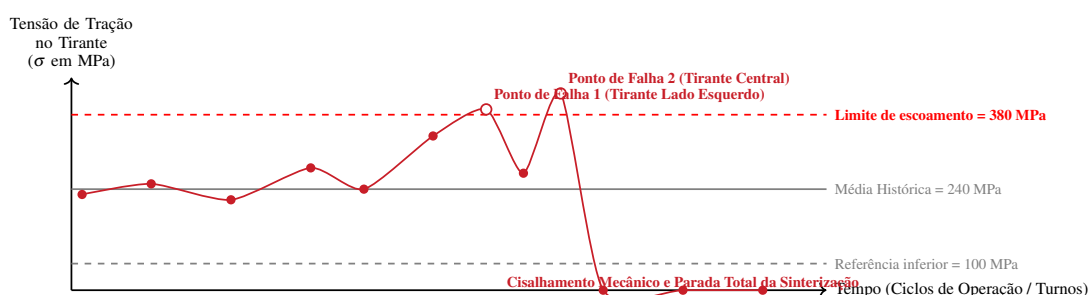
Em seguida, foram avaliadas a condição atual do equipamento e as consequências provocadas pela falha. O evento consistiu no cisalhamento e no arrancamento dos tirantes principais da carcaça, resultando no desalinhamento severo do leito de grelhas e na necessidade de uma parada emergencial imediata da máquina, devido ao risco de agravamento da condição estrutural. Entre os impactos observados, destacaram-se a interrupção total do fluxo produtivo de síter destinado aos Altos-Fornos, a deformação plástica localizada nas placas de desgaste laterais e a elevação da infiltração de ar espúrio no sistema de exaustão principal, provocando perda de vácuo. Para mensurar a gravidade

da ocorrência, adotou-se como indicador o Tempo Médio de Reparo (MTTR), registrado em 18,2 horas, valor considerado incompatível com a criticidade do equipamento e com a condição ideal de ausência de falhas estruturais. Ademais, verificou-se uma condição operacional associada à variação térmica, caracterizada por variações de temperatura superiores a 20 °C nas vigas de apoio.

Posteriormente, foram definidos os objetivos e as metas da intervenção. A condição desejada consistiu em assegurar a estabilidade mecânica do conjunto e manter o aperto nominal dos tirantes, mesmo durante a operação em regime de alta temperatura, garantindo também a vedação contra entradas de ar falso. Do ponto de vista quantitativo, a principal meta estipulada pela equipe foi reduzir a zero as ocorrências de rompimento dos tirantes de fixação durante os 12 meses seguintes à implantação das melhorias. Além disso, como meta secundária de confiabilidade, determinou-se que o MTTR das intervenções civis e mecânicas estruturais fosse mantido abaixo de duas horas, permitindo o rápido restabelecimento da operação em situações de manutenção.

Na sequência, os dados reais de tensão mecânica dos tirantes foram analisados em relação aos valores históricos e aos limites de engenharia do material. A análise indicou aumento da tensão durante os ciclos de aquecimento. O valor de 380 MPa corresponde ao limite de escoamento adotado como referência de engenharia, e não a um limite superior de controle estatístico. Registros acima desse valor indicam possibilidade de deformação plástica e exigem investigação mecânica, não sendo suficientes, isoladamente, para afirmar colapso estrutural, conforme apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Comportamento da tensão mecânica atuante nos tirantes de fixação



Fonte: Elaborado pelo autor.

A verificação realizada pelos profissionais da área indicou que o modelo de

fixação rígida empregado no projeto impedia a movimentação necessária para acomodar a dilatação térmica da grelha. Consequentemente, os tirantes eram obrigados a absorver integralmente a expansão volumétrica do conjunto, tornando-se o elo mais frágil da estrutura. Dessa forma, foi considerada como principal causa potencial a inexistência de um sistema amortecedor flexível capaz de acomodar os picos de dilatação térmica sem transferir a sobrecarga mecânica diretamente para os parafusos e demais elementos de fixação.

Além disso, após a identificação da causa potencial, foram propostas contramedidas direcionadas à absorção da dilatação térmica, ao aumento da resistência dos componentes e ao aprimoramento do monitoramento do equipamento. O direcionamento estratégico foi dividido em três frentes complementares. A primeira correspondeu ao redesenho de engenharia, com a substituição do modelo de fixação rígida por tirantes articulados equipados com conjuntos de molas prato, capazes de absorver e compensar dinamicamente as variações dimensionais provocadas pelo aquecimento. A segunda frente concentrou-se no *upgrade* de material, determinando a substituição do aço carbono convencional por uma liga de maior resistência térmica, como o aço especificado pela norma ASTM A193 B16, cuja adequação deve ser confirmada com base nas propriedades do material e na temperatura real de serviço. Por sua vez, a terceira frente esteve relacionada ao controle do processo, prevendo a instalação de termopares e de um sistema de monitoramento de vibração *on-line*, com a finalidade de identificar precocemente a formação de pontos quentes, denominados *hot spots*, e possíveis alterações no comportamento mecânico do conjunto.

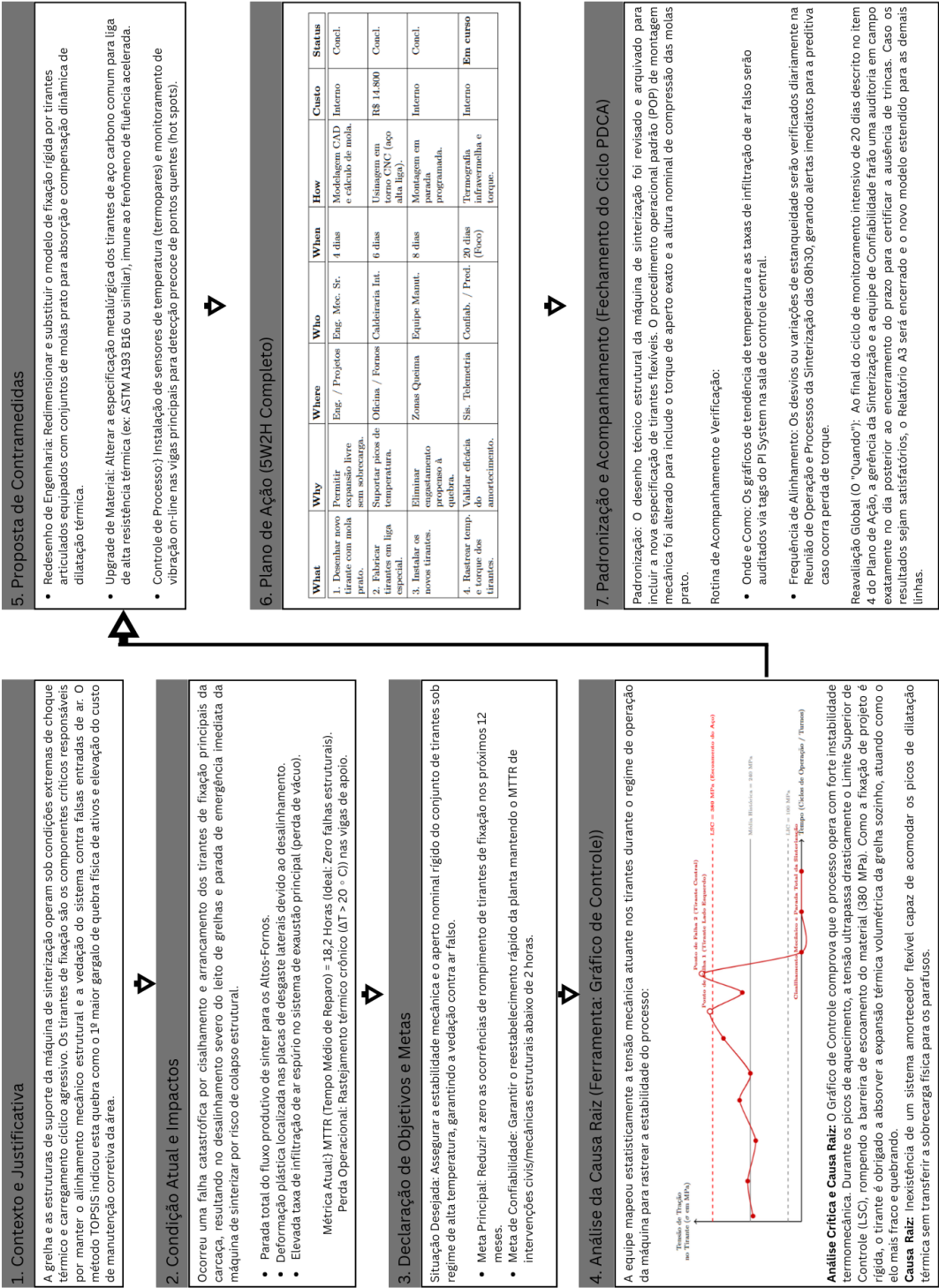
Assim, as contramedidas foram organizadas em um plano de ação proposto por meio da ferramenta 5W2H, estruturado em quatro frentes gerenciais. A primeira ação consistiu no desenvolvimento do novo modelo de tirante articulado com mola prato, sob responsabilidade da Engenharia de Projetos, com duração prevista de quatro dias e utilização de recursos internos. Em seguida, a segunda ação correspondeu à fabricação dos novos tirantes em liga especial, realizada na Oficina Interna com a utilização de torno CNC, com duração prevista de seis dias e custo estimado de R\$ 14.800,00. A terceira ação compreendeu a instalação dos novos tirantes pela equipe de Manutenção durante uma parada programada, com duração prevista de oito dias e utilização de recursos internos. Por fim, a quarta ação envolveu o acompanhamento da temperatura e do torque

por meio do sistema de telemetria, sob responsabilidade da equipe de Confiabilidade, durante um período de 20 dias. Essa etapa utiliza inspeções termográficas e medições de torque, apresenta custo interno e foi prevista para ocorrer após eventual implantação.

Por fim, foram estabelecidas medidas de padronização e acompanhamento com o objetivo de orientar o acompanhamento das melhorias propostas e apoiar o acompanhamento das ações propostas, correspondente às etapas *Plan*, *Do*, *Check* e *Act*. Propôs-se a revisão e o arquivamento do desenho técnico estrutural, assegurando que o novo modelo de tirante fosse adotado como referência para intervenções futuras. Ademais, propôs-se atualizar o Procedimento Operacional Padrão (POP) de montagem mecânica para incluir o torque exato de aperto e a altura nominal de compressão das molas prato. Como forma de acompanhamento, propôs-se que os gráficos de tendência térmica e as taxas de infiltração de ar fossem monitorados por meio das *tags* do PI System, com eventuais desvios analisados durante a Reunião de Operação diária, realizada às 08h30. Para o encerramento da tratativa, estabeleceu-se a realização de uma auditoria formal de campo pela gerência no dia seguinte ao término dos 20 dias de monitoramento intensivo, com a finalidade de verificar a ausência de trincas, avaliar o desempenho do novo arranjo e autorizar a extensão do modelo para as demais linhas.

O Relatório A3 referente à anomalia de rompimento dos tirantes de fixação da máquina de sinterização encontra-se apresentado na página seguinte para verificação, conforme a Figura 12.

Figura 12 – A3 do rompimento dos tirantes de fixação



4.3.4 Caso da Moagem: Parada Acidental Prolongada

O circuito de moagem atua como uma etapa central do processo de redução granulométrica em plantas minerais, sendo indispensável para favorecer a liberação adequada dos minerais destinados aos processos de concentração subsequentes. Nesse contexto, paradas prolongadas nesse ativo comprometem imediatamente a capacidade produtiva de toda a planta industrial. O presente caso analisa uma disfunção crônica relacionada à disponibilidade do equipamento, na qual desarmes operacionais recorrentes têm provocado interrupções severas que ultrapassam sistematicamente o limite tolerável de tempo de intervenção.

Diante da criticidade da ocorrência e da necessidade de otimizar o restabelecimento do equipamento, a equipe de engenharia aplicou a metodologia do Relatório A3. Essa ferramenta permitiu estruturar a investigação de maneira sistêmica, abrangendo desde a caracterização das paradas e a identificação dos fatores associados até a definição das contramedidas, do plano de ação e das medidas de acompanhamento.

Inicialmente, analisaram-se o contexto e a justificativa da ocorrência, considerando-se que a elevada disponibilidade física do circuito de moagem é essencial para assegurar a continuidade do processo produtivo. A priorização do problema não foi realizada apenas de maneira empírica, mas fundamentada na aplicação do método TOPSIS, uma técnica de tomada de decisão multicritério. A partir dessa análise, as paradas de moagem com duração superior a 120 minutos foram classificadas como o quarta posição no ranking multicritério. O método não permite afirmar, isoladamente, que esse seja o evento de maior impacto financeiro, pois não foi realizada análise econômica específica.

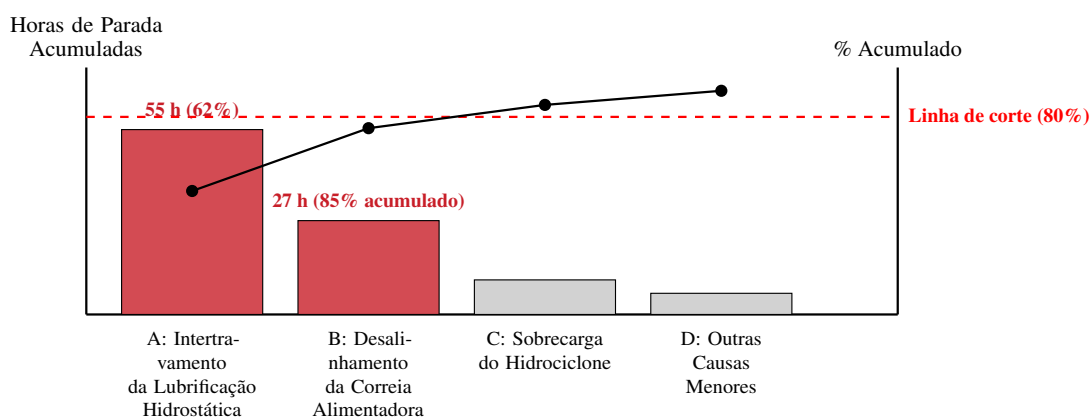
Em seguida, foram avaliadas a condição atual do equipamento e as consequências provocadas pelas paradas prolongadas. O moinho apresentava episódios recorrentes de desarmes operacionais, seguidos de atrasos significativos no restabelecimento de suas condições normais de funcionamento. Entre os impactos diretos, destacaram-se o esvaziamento completo das caixas pulmão e dos silos localizados a jusante, a elevada sobrecarga elétrica durante a partida do motor principal, caracterizada por intensos picos de corrente, e o desperdício de insumos associado à necessidade de purga manual da carga acumulada no interior do moinho. Para mensurar a criticidade do problema, adotou-se como indicador a Duração Média da Parada Acidental, registrada em 175 minutos, valor

significativamente superior ao limite máximo tolerável de 120 minutos.

Posteriormente, foram definidos os objetivos e as metas da intervenção. A condição desejada consistiu em reduzir a ocorrência de desarmes severos e otimizar os procedimentos técnicos de resposta, de modo a favorecer que nenhuma parada accidental ultrapassasse o período de duas horas. Do ponto de vista quantitativo, a principal meta estabelecida pela equipe foi buscar que 100% das paradas imprevistas fossem solucionadas em menos de 120 minutos. Dessa forma, buscou-se reduzir progressivamente a média geral do indicador de indisponibilidade e restabelecer o equipamento dentro do limite operacional considerado aceitável.

Na sequência, realizou-se a análise dos fatores associados às paradas, utilizando-se o Diagrama de Pareto para estratificar os dados históricos referentes às horas totais de parada. Essa ferramenta permitiu ordenar as categorias de acordo com sua participação no tempo de indisponibilidade e direcionar os esforços da equipe para os eventos de maior impacto, conforme apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Diagrama de Pareto dos fatores associados de paradas accidentais prolongadas no circuito de moagem



Fonte: Elaborado pelo autor.

O gráfico indicou que as ocorrências registradas como intertravamento do sistema de lubrificação hidrostática concentraram a maior parcela do tempo de parada, acumulando 55 horas de interrupção e representando 62% do tempo total perdido. A segunda categoria mais relevante foi o desalinhamento da correia alimentadora, responsável por 27

horas de parada e por elevar o percentual acumulado das duas principais ocorrências para 85%. Assim, essas duas categorias foram consideradas prioritárias para aprofundamento para reduzir o tempo de resposta e aumentar a disponibilidade física do circuito.

Além disso, após a identificação das categorias de maior impacto, foram propostas contramedidas direcionadas aos maiores ofensores demonstrados pelo Diagrama de Pareto. Para os eventos de intertravamento da lubrificação hidrostática, definiu-se a implantação de uma redundância ativa, por meio da instalação de uma motobomba reserva em paralelo no circuito hidráulico de óleo dos mancais. Essa ação foi complementada por uma automação de emergência, com a programação de uma lógica no Controlador Lógico Programável (PLC) para realizar a comutação instantânea e a partida automática da bomba reserva quando a pressão do sistema atingisse valores inferiores a 1,8 bar. Para os eventos relacionados ao desalinhamento da correia alimentadora, adotou-se uma estratégia de manutenção preditiva, determinando-se a substituição preventiva dos sensores existentes por modelos blindados e mais resistentes ao acúmulo de poeira e às vibrações do processo.

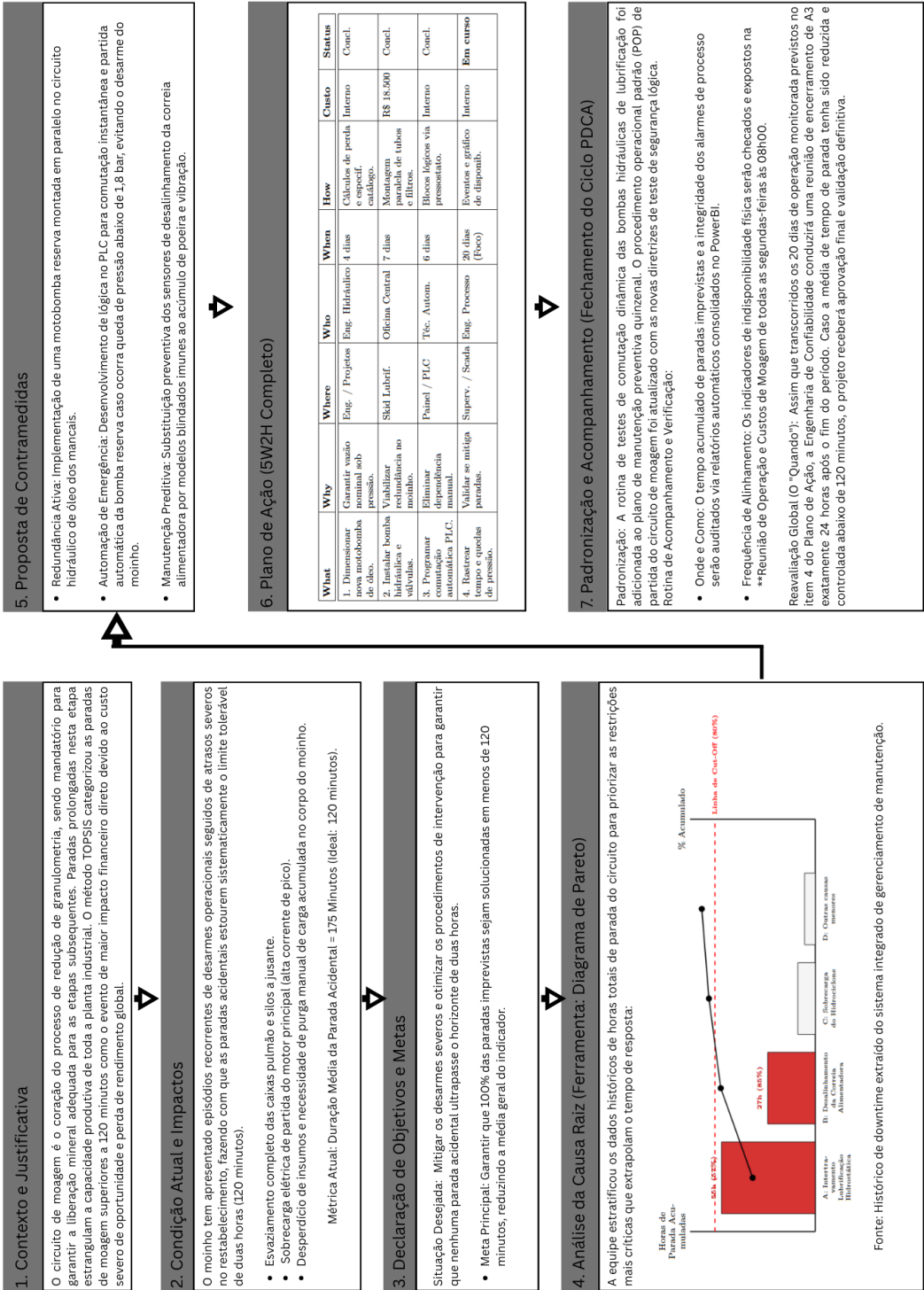
Assim, as contramedidas foram organizadas em um plano de ação proposto por meio da ferramenta 5W2H, estruturado em quatro frentes gerenciais. A primeira ação consistiu no dimensionamento da nova motobomba nominal de óleo, sob responsabilidade da Engenharia Hidráulica, com duração de quatro dias, utilização de recursos internos e execução proposta. Em seguida, a segunda ação correspondeu à instalação da bomba hidráulica e das válvulas no *skid* de lubrificação, executada pela Oficina Central ao longo de sete dias, com custo de R\$ 18.500,00, também proposta. A terceira ação compreendeu a programação da lógica de comutação automática do pressostato no PLC, realizada pelo Técnico de Automação durante seis dias, com utilização de recursos internos e execução proposta. Por fim, a quarta ação envolveu o acompanhamento do tempo das paradas e das quedas de pressão por meio do sistema SCADA, sob responsabilidade da Engenharia de Processo, durante um período de 20 dias, utilizando recursos internos e encontrando-se com o status “Em curso” no momento da elaboração do relatório.

Por fim, foram estabelecidas medidas de padronização e acompanhamento com o objetivo de orientar o acompanhamento das melhorias propostas e apoiar o acompanhamento das ações propostas, correspondente às etapas *Plan*, *Do*, *Check* e *Act*. A rotina de testes de comutação dinâmica das bombas hidráulicas propôs-se que fosse incorporada

ao plano de manutenção preventiva, passando a ser executada quinzenalmente. Ademais, o Procedimento Operacional Padrão (POP) de partida da moagem foi atualizado para contemplar as novas condições de funcionamento do sistema de lubrificação. Para o acompanhamento contínuo, o tempo acumulado das paradas imprevistas passou a ser auditado por meio de relatórios consolidados no Power BI, e os indicadores de indisponibilidade foram incluídos na Reunião de Operação e Custos da Moagem, realizada semanalmente às segundas-feiras, às 08h00. A reavaliação global deverá ocorrer 24 horas após o encerramento dos 20 dias de operação monitorada, ocasião em que a Engenharia de Confiabilidade conduzirá a reunião de encerramento para verificar se a duração média das paradas foi mantida abaixo de 120 minutos e, conseqüentemente, avaliar inicialmente as ações implantadas.

O Relatório A3 referente à anomalia de parada acidental prolongada no circuito de moagem encontra-se apresentado na página seguinte para verificação, conforme a Figura 14.

Figura 14 – A3 da parada accidental prolongada no circuito de moagem



4.4 Discussões sobre as propostas de aplicação e facilitadores de implementação

Esta seção discute as condições que podem favorecer a implementação das ações apresentadas nos Relatórios A3. Esses fatores não foram investigados por meio de entrevistas específicas, categorização formal ou instrumento próprio de pesquisa. Portanto, não são apresentados como resultados empíricos independentes, mas como condições potenciais inferidas a partir das discussões técnicas realizadas durante a elaboração dos relatórios, das características dos processos e dos planos de ação propostos.

No caso da queda da caçamba do teleférico, parte das ações foi efetivamente implementada durante o período da pesquisa. A prioridade atribuída à segurança dos trabalhadores, a definição clara das responsabilidades e a possibilidade de incorporar as verificações às rotinas de manutenção foram consideradas condições favoráveis à execução. Entretanto, não foram medidos adesão das equipes, aprovação gerencial, retorno econômico ou redução definitiva da recorrência. O acompanhamento posterior permanece necessário para avaliar a eficácia das medidas adotadas.

Para o descontrole de umidade na sinterização, foram propostas ações de proteção do sensor, limpeza automatizada da lente e tratamento lógico dos sinais. A possibilidade de reduzir intervenções manuais e integrar o acompanhamento aos sistemas já utilizados pela operação foi identificada como uma condição potencialmente favorável. Como essas ações não foram implementadas no período da pesquisa, não é possível afirmar que ocorreram redução da carga de trabalho, adesão dos operadores ou estabilização do processo.

No caso dos tirantes de fixação, as propostas envolveram alteração do arranjo mecânico, seleção de material e monitoramento das condições térmicas e mecânicas. A disponibilidade de oficina interna e de profissionais especializados pode favorecer uma futura implementação. Contudo, não foi realizada análise de retorno sobre o investimento, comparação econômica entre alternativas ou validação do novo dimensionamento em operação. Dessa forma, o custo informado no plano de ação deve ser interpretado como estimativa, e não como evidência de baixo custo ou retorno rápido.

Para a parada prolongada do circuito de moagem, o Diagrama de Pareto permitiu

identificar as categorias que concentraram a maior parcela das horas de indisponibilidade. O intertravamento da lubrificação foi tratado como um modo de parada ou resposta de proteção associado à condição anormal do sistema, não como causa física definitiva. A proposta de redundância da motobomba somente será adequada se verificações posteriores confirmarem que a indisponibilidade da bomba ou a perda de pressão constituem fatores relevantes para a atuação do intertravamento. A integração dos testes e indicadores aos sistemas supervisórios e às reuniões existentes foi considerada uma condição potencialmente favorável à implementação, mas sua efetividade ainda precisa ser avaliada.

De modo geral, a existência de responsáveis definidos, dados operacionais disponíveis, rotinas de acompanhamento e participação de profissionais das áreas específicas pode favorecer a implementação das propostas. Entretanto, esses aspectos não foram avaliados por um procedimento metodológico próprio e não permitem afirmar aprovação imediata, adesão integral, ausência de resistência ou retorno econômico. Para os três casos não implementados, os Relatórios A3 representam produtos de planejamento e proposição de intervenção. No caso da caçamba, o trabalho avançou parcialmente para a execução e o acompanhamento inicial, sem validação longitudinal suficiente para confirmar a sustentação dos resultados.

5 Conclusões

A indústria siderúrgica é caracterizada por processos contínuos, elevada complexidade operacional e condições severas de funcionamento, o que exige abordagens estruturadas para a identificação, a priorização e o tratamento de anomalias. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo propor ações de gestão voltadas à mitigação de anomalias operacionais por meio da integração entre o método de apoio à decisão multicritério TOPSIS e o Relatório A3.

Os objetivos estabelecidos foram atendidos no que se refere ao mapeamento das anomalias, à construção da matriz de decisão, à aplicação do TOPSIS, à seleção das ocorrências prioritárias e à elaboração dos Relatórios A3. Entretanto, o alcance do estudo deve ser interpretado considerando que apenas parte das ações relacionadas ao caso da queda da caçamba foi implementada durante o período da pesquisa, enquanto as contramedidas associadas aos demais casos permaneceram como propostas. Dessa forma, o trabalho não comprova a eficácia integral das soluções nem o fechamento completo do ciclo PDCA em todas as ocorrências analisadas.

O primeiro objetivo específico foi atendido por meio do levantamento e da caracterização de 32 anomalias operacionais identificadas nos setores analisados. Esse conjunto foi avaliado por um comitê técnico segundo seis critérios: Produção, Segurança, Custo, Qualidade, Meio Ambiente e Fatores Humanos. As notas foram definidas por consenso entre os especialistas, com base nos registros históricos, nas informações técnicas disponíveis e na experiência dos participantes. Esse procedimento permitiu estruturar a matriz de decisão, embora tenha mantido a influência do julgamento humano na atribuição das avaliações e dos pesos.

A aplicação do TOPSIS possibilitou organizar quantitativamente a priorização das anomalias e gerar um ranking segundo os critérios e pesos adotados. O método não eliminou a subjetividade do processo decisório, pois os critérios, os pesos e as notas foram definidos com participação de especialistas. Sua contribuição consistiu em tornar essas escolhas explícitas, submetê-las a um procedimento matemático uniforme e aumentar a transparência e a rastreabilidade da priorização. As quatro primeiras posições

do ranking foram ocupadas pela queda da caçamba do teleférico, pelo descontrole de umidade das partículas na sinterização, pelo rompimento dos tirantes de fixação e pela parada acidental prolongada no circuito de moagem.

A seleção das quatro ocorrências para aprofundamento não decorreu de um limiar matemático específico. A escolha considerou a posição no ranking e a limitação de tempo disponível para o desenvolvimento da pesquisa. O ranking foi posteriormente apresentado ao comitê técnico, que avaliou sua coerência em relação ao histórico operacional e ao conhecimento dos processos. Entretanto, não foi realizada análise de sensibilidade dos pesos, de modo que não foi possível verificar se pequenas alterações na ponderação modificariam a composição das primeiras posições.

Com base no ranking, foram elaborados Relatórios A3 para as quatro anomalias priorizadas. As ferramentas da qualidade empregadas, como fluxograma, Diagrama de Ishikawa, Diagrama de Pareto e gráficos de acompanhamento, apoiaram a organização das informações e a análise das causas potenciais associadas às ocorrências. Essas ferramentas não foram consideradas, isoladamente, suficientes para comprovar relações causais. As hipóteses levantadas foram avaliadas por profissionais das áreas específicas, utilizando registros históricos, dados operacionais, inspeções e conhecimento técnico.

No caso da queda da caçamba do teleférico, a análise indicou que o mecanismo físico da falha estava associado ao desgaste e à fadiga do conjunto de fixação, enquanto a ausência de monitoramento representava uma deficiência de detecção antecipada. Parte das ações previstas para esse caso foi efetivamente implementada durante o período da pesquisa, incluindo intervenções de inspeção, substituição de componentes e monitoramento. Ainda assim, o período de acompanhamento disponível não permite afirmar a eliminação definitiva da possibilidade de recorrência.

No caso do descontrole de umidade, o Relatório A3 organizou evidências relacionadas à contaminação do sensor, às condições ambientais e às limitações do procedimento de limpeza. A ausência de um sistema automatizado de limpeza foi tratada como uma hipótese técnica relevante, validada pelos profissionais da área, mas as contramedidas correspondentes permaneceram como propostas e não tiveram sua eficácia acompanhada longitudinalmente.

Para o rompimento dos tirantes, a análise indicou a influência das condições

termomecânicas e da configuração rígida do sistema de fixação. Foram propostas alterações de projeto, material e monitoramento, porém essas medidas não foram implantadas e validadas dentro do período da pesquisa. Dessa forma, não é possível afirmar que o problema tenha sido solucionado ou que as propostas apresentem eficácia comprovada.

No caso da moagem, o Diagrama de Pareto permitiu identificar as categorias associadas à maior parcela das horas de parada. O intertravamento do sistema de lubrificação foi interpretado como um modo de parada ou uma resposta de proteção do sistema, e não automaticamente como causa fundamental. As contramedidas propostas, incluindo a possibilidade de redundância do sistema, dependem de investigação adicional sobre o fenômeno que provoca a atuação do intertravamento e de validação futura no ambiente operacional.

A integração entre TOPSIS e Relatório A3 constituiu uma sequência metodológica na qual o TOPSIS apoiou a priorização das anomalias e o A3 estruturou a análise e a proposição de ações. O estudo não formalizou um modelo de gestão autônomo com mecanismos próprios de retroalimentação, entradas e saídas distintas das metodologias utilizadas. Portanto, a contribuição deve ser compreendida como uma proposta de integração sequencial entre um método multicritério e uma abordagem estruturada de solução de problemas.

Também não foram avaliadas diretamente a carga cognitiva das equipes, a viabilidade econômica das soluções, o retorno sobre o investimento ou a robustez das contramedidas. Assim, não se pode concluir que as propostas reduziram a carga cognitiva, apresentaram retorno rápido ou produziram resultados robustos. Esses aspectos permanecem como possibilidades a serem verificadas após implantação e acompanhamento sistemático.

Do ponto de vista teórico, o trabalho contribui para a discussão sobre a integração entre métodos de decisão multicritério e metodologias estruturadas de solução de problemas no contexto siderúrgico. A revisão sistemática não permite afirmar a inexistência de estudos sobre essa integração, mas indicou escassez de trabalhos identificados pela estratégia de busca adotada. Dessa forma, a contribuição consiste em ampliar as aplicações reportadas e documentar uma possibilidade de articulação entre TOPSIS, Relatório A3 e ferramentas da qualidade em um estudo de caso industrial.

5.1 Limitações da pesquisa

Esta pesquisa apresenta limitações relacionadas ao escopo, à construção da matriz de decisão, à ponderação dos critérios, à seleção das anomalias, à análise das causas e à implantação das propostas.

A primeira limitação está associada ao recorte do estudo de caso, realizado em uma unidade siderúrgica específica e envolvendo ocorrências dos setores de Sinterização, Teleférico e Moagem. Os resultados refletem as características técnicas, operacionais e organizacionais do ambiente analisado e não podem ser generalizados diretamente para outras plantas ou segmentos industriais.

Outra limitação refere-se às avaliações utilizadas na matriz de decisão. As notas foram definidas por consenso entre os especialistas, e não por medições independentes ou por médias estatísticas de avaliações individuais. Embora o consenso tenha permitido construir valores únicos para cada combinação entre anomalia e critério, ele pode incorporar influência de participantes mais experientes, relações hierárquicas, convergência social ou diferenças na interpretação da escala.

Os pesos dos critérios também foram definidos pelo corpo técnico e refletem as prioridades do contexto analisado. Não foi utilizado um procedimento estruturado de elicitação, como AHP, *swing weighting* ou outro método específico para determinação dos pesos. Além disso, não foi realizada análise de sensibilidade. Essa ausência é especialmente relevante devido à proximidade entre os coeficientes das alternativas classificadas entre a terceira e a sétima posições, pois pequenas alterações na ponderação poderiam modificar a composição do grupo selecionado.

O levantamento concentrou-se nas anomalias de maior recorrência em razão do tempo disponível para a pesquisa. Essa delimitação pode ter excluído eventos raros, porém potencialmente graves, sobretudo sob a perspectiva da segurança. Assim, a frequência de ocorrência não deve ser interpretada como único indicador de criticidade.

A seleção das quatro primeiras anomalias para aplicação do Relatório A3 não foi determinada por um corte matemático, estatístico ou por um valor mínimo do coeficiente de proximidade. A escolha decorreu da posição no ranking e da limitação temporal do trabalho. Portanto, o número de casos analisados representa uma decisão de escopo e

não uma propriedade do método TOPSIS.

Outra limitação está relacionada à validação das causas. As ferramentas da qualidade utilizadas apoiaram a identificação e a organização de hipóteses causais, mas não comprovaram isoladamente as causas-raiz. Embora as análises tenham sido verificadas por profissionais das áreas específicas, não foram realizados, em todos os casos, experimentos controlados, ensaios laboratoriais, análises metalográficas, estudos estatísticos de correlação ou acompanhamento antes e depois da intervenção.

Também se destaca que somente parte das ações do caso da queda da caçamba foi implementada durante o período da pesquisa. As contramedidas dos casos de descontrole de umidade, rompimento dos tirantes e parada prolongada da moagem permaneceram como propostas. Por essa razão, não houve verificação longitudinal da eficácia, da recorrência das falhas, dos impactos econômicos, dos efeitos sobre a segurança ou da consolidação dos novos padrões de trabalho.

A revisão sistemática também apresenta limitações relacionadas às bases consultadas, às strings utilizadas, aos filtros, ao período analisado e aos critérios de inclusão e exclusão. A ausência de documentos recuperados por determinada combinação de termos não comprova a inexistência de estudos, mas apenas que eles não foram identificados pela estratégia de busca adotada.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se implantar e acompanhar as contramedidas propostas nos Relatórios A3, utilizando períodos de observação compatíveis com a frequência e a natureza das anomalias. Esse acompanhamento pode permitir a comparação entre os indicadores anteriores e posteriores à intervenção, incluindo recorrência, tempo de parada, disponibilidade dos equipamentos, custos de manutenção e indicadores de segurança.

Também se recomenda realizar análise de sensibilidade dos pesos utilizados no TOPSIS. A aplicação de diferentes cenários de ponderação pode demonstrar a estabilidade do ranking e verificar se as primeiras posições permanecem inalteradas diante de pequenas variações. Estudos futuros também podem utilizar métodos estruturados de

elicitação de pesos, como AHP, *swing weighting* ou técnicas baseadas em ordenação.

Outra possibilidade consiste em comparar os resultados do TOPSIS com outros métodos de decisão multicritério, como VIKOR, PROMETHEE, ELECTRE ou AHP. Essa comparação pode identificar diferenças na ordenação das anomalias e avaliar a influência das características de cada método sobre o resultado.

Recomenda-se ainda ampliar o procedimento de coleta das avaliações, utilizando notas individuais antes da etapa de consenso. Essa abordagem permitiria calcular médias, dispersões e níveis de concordância entre os especialistas, além de reduzir a perda de informações decorrente da consolidação direta em um único valor.

Futuros trabalhos também podem incluir eventos raros e de elevada severidade, utilizando critérios específicos que permitam considerar simultaneamente frequência, consequência e capacidade de detecção. Essa ampliação pode reduzir o risco de exclusão de ocorrências pouco frequentes, mas potencialmente catastróficas.

No que se refere à investigação causal, recomenda-se complementar as ferramentas da qualidade com métodos específicos de validação, como ensaios não destrutivos, análise de falhas, testes controlados, análise estatística, monitoramento instrumental e comparação antes e depois da intervenção. Esses procedimentos podem aumentar a confiança na identificação das causas e na relação entre as contramedidas e os resultados observados.

Também se sugere formalizar a integração entre TOPSIS e Relatório A3 em uma estrutura com entradas, etapas, responsáveis, critérios de decisão, saídas e mecanismos de retroalimentação. Essa formalização poderá permitir que a sequência metodológica seja avaliada como um modelo de gestão e aplicada de forma padronizada em diferentes unidades industriais.

Por fim, recomenda-se ampliar a revisão sistemática, incorporando novas bases, períodos mais extensos, diferentes idiomas e estratégias de busca mais sensíveis. Essa ampliação pode favorecer uma compreensão mais abrangente das aplicações de métodos multicritério e ferramentas estruturadas de solução de problemas na indústria de processos contínuos.

Referências

- ANDRADE, J. J. de O.; DHIEL, C. Avaliação do processo de fabricação de blocos de concreto através do emprego do controle estatístico do processo. **Anais do XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2011, Brasil**, 2011.
- BEHZADIAN, M.; OTAGHSARA, S. K.; YAZDANI, M.; IGNATIUS, J. A state-of-the-art survey of topsis applications. **Expert Systems with applications**, Elsevier, v. 39, n. 17, p. 13051–13069, 2012.
- CARVALHO, M. M. C.; PALADINI, E. P. **Gestão da Qualidade: Teoria e Casos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Campus/Elsevier, 2012. [Acervo físico].
- DEMING, W. E. **Qualidade: A revolução da administração**. Rio de Janeiro: Marques Saraiva, 1990. [Acervo físico].
- FALCONI, V. **Gerenciamento da rotina do trabalho do dia-a-dia**. [S.l.]: Falconi Editora, 2013.
- ISHIKAWA, K. Controle de qualidade total à maneira japonesa. In: **Controle de qualidade total à maneira japonesa**. [S.l.: s.n.], 1993. p. 221–221.
- JURAN, J. M. **Juran on quality by design: the new steps for planning quality into goods and services**. [S.l.]: Simon and Schuster, 1992.
- KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção-função estratégica**. [S.l.]: Qualitymark Editora Ltda, 2009.
- KOUL, S.; SAMANTARAY, P. *et al.* Reductions in the prime stock for sales generation in steel industry: A lean approach using dmaic tools. **International Journal of Operations and Quantitative Management**, INFORS, v. 27, n. 1, p. 23–44, 2021.
- LIKER, J. K.; HOSEUS, M. **A cultura Toyota: a alma do modelo Toyota**. [S.l.]: Bookman Editora, 2016.
- LINS, B. F. Ferramentas básicas da qualidade. **Ciência da Informação**, v. 22, n. 2, p. 153–161, 1993.
- MELLO, C. H. P.; TURRIONI, J. B.; XAVIER, A. F.; CAMPOS, D. F. Pesquisa-ação na engenharia de produção: proposta de estruturação para sua condução. **Production**, SciELO Brasil, v. 22, p. 1–13, 2012.

- MONTGOMERY, D. C. **Introduction to statistical quality control**. [S.l.]: John Wiley & sons, 2020.
- MOURÃO, M. B.; YOKOJI, A.; MALYNOWSKYJ, A.; LEANDRO, C. A. d. S.; TAKANO, C.; QUITES, E. E. C.; GENTILE, E. F.; SILVA, G. F. B. L.; BOLOTA, J. R.; GONÇALVES, M. *et al.* Introdução à siderurgia. 2007.
- OUCHAMA, S.; BADR, D.; IRHIRANE, E. H. Benefits of the changes of iso9001: 2015 on organisational performance. **International Journal of Productivity and Quality Management**, Inderscience Publishers (IEL), v. 40, n. 3, p. 406–428, 2023.
- PACHECO, P. E. **Gestão da qualidade: Teoria e prática**. São Paulo: Atlas, 2019. [Acervo virtual: Plataforma Ebooks Minha biblioteca].
- PAGE, M. J.; MCKENZIE, J. E.; BOSSUYT, P. M.; BOUTRON, I.; HOFFMANN, T. C.; MULROW, C. D.; SHAMSEER, L.; TETZLAFF, J. M.; AKL, E. A.; BRENNAN, S. E. *et al.* The prisma 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **bmj**, British Medical Journal Publishing Group, v. 372, 2021.
- PALADINI, E. P. **Gestão da qualidade: Teoria e prática**. São Paulo: Atlas, 2019. [Acervo virtual – Minha Biblioteca].
- PAPATHANASIOU, J.; PLOSKAS, N. Topsis. In: **Multiple criteria decision aid: Methods, examples and python implementations**. [S.l.]: Springer, 2018. p. 1–30.
- PINTO, V. B. Informação: a chave para a qualidade total. **Ciência da Informação**, v. 22, n. 2, 1993.
- PORTER, M. E. **Vantagem competitiva: criando e sustentando um desempenho superior**. [S.l.]: Elsevier Editora, 1989.
- RIBEIRO, P. d. F. Aplicação da metodologia a3 como instrumento de melhoria contínua em uma empresa da indústria de linha branca. **Monografia do Curso de Engenharia de Produção da Escola de engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo**. São Carlos, 2012.
- SAIED, E.; GALAL, N. M.; EL-SAYED, A. E. Material and energy wastes reduction in steel production through the application of lean manufacturing tools. In: **Proc. Int. Conf. Ind. Eng. Oper. Manage**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 2346–2353.
- SANTOS, A. P.; POZZETTI, J. V. T.; MORAES, P. d.; AVELINO, C. H. Utilização da ferramenta diagrama de pareto para auxiliar na identificação dos principais problemas nas empresas. **Recuperado de <https://unisalesiano.com.br/aracatuba/wp-content/uploads/2020/12/Artigo>**, 2020.

SHEWHART, W. A.; DEMING, W. E. **Statistical method from the viewpoint of quality control**. [S.l.]: Courier Corporation, 1986.

TORRE, N. M. d. M.; SALOMON, V. A. P.; FLOREK-PASZKOWSKA, A. K. Multi-criteria classification of spare parts in the steel industry. **Brazilian Journal of Operations and Production Management**, ABEPRO, v. 22, n. 1, p. e20252344, 2025.

TZENG, G.-H.; HUANG, J.-J. **Multiple attribute decision making: methods and applications**. [S.l.]: CRC press, 2011.

World Steel Association. **World Steel in Figures 2025**. Brussels, Belgium, 2025. Accessed: 2026-04-14. Disponível em: <<https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures/world-steel-in-figures-2025/>>.

YOON, K. P.; HWANG, C.-L. **Multiple attribute decision making: an introduction**. [S.l.]: Sage publications, 1995.