



ANÁLISE DE MODO E EFEITO DE FALHA EM UMA MÁQUINA RECUPERADORA DE MINÉRIO DE FERRO

Failure mode and effect analysis of an iron ore recovery machine

Análisis de modo de fallo y efecto de una máquina de recuperación de mineral de hierro

Maurélio Ferreira Costa¹, Felipe Ribeiro Teixeira², Matheus da Cunha Brito³, Harley dos Santos Martins^{4*}, & Louíse de Castro Lobo Cardoso⁵

^{1 2 3 4 5} Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Faculdade de Engenharia Mecânica

¹maureliocg@hotmail.com ²teixeira.304@hotmail.com ³matheus.brito@itec.ufpa.br ^{4*}harley@ufpa.br

⁵loloprojetosufpa@gmail.com

ARTIGO INFO.

Recebido: 20.10.2025

Aprovado: 30.01.2026

Disponibilizado: 17.03.2026

PALAVRAS-CHAVE: Mineração; FMEA; disponibilidade física.

KEYWORDS: Mining; FMEA; physical availability.

PALABRAS CLAVE: Minería; FMEA; disponibilidad física.

*Autor Correspondente: Martins, H. dos S.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é aumentar a disponibilidade física de uma máquina recuperadora de minério de ferro. Para isso, recorreu-se a utilização da metodologia de Análise de Modo e Efeito de Falha, que é amplamente empregada pela literatura e frequentemente referenciada pelo acrônimo em inglês FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*). Após identificação das causas potenciais para falha, ações corretivas foram propostas e realizadas pela equipe de manutenção. Ao fim, constatou-se a melhora do indicador de disponibilidade física.

ABSTRACT

The objective of this work is to increase the physical availability of an iron ore recovery machine. To this end, the Failure Mode and Effect Analysis methodology was used, which is widely used in the literature and often referred to by the acronym FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*). After identifying the potential causes of failure, corrective actions were proposed and carried out by the maintenance team. In the end, an improvement in the physical availability indicator was observed.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es aumentar la disponibilidad física de una máquina de recuperación de mineral de hierro. Para ello, se empleó la metodología de Análisis Modal de Fallas y Efectos (FMEA), ampliamente utilizada en la literatura y conocida por su acrónimo (FMEA). Tras identificar las posibles causas de las fallas, el equipo de mantenimiento propuso e implementó acciones correctivas. Como resultado, se observó una mejora en el indicador de disponibilidad física.

INTRODUÇÃO

Com o advento da economia globalizada, observa-se uma crescente demanda por produtos e sistemas de melhor desempenho a custos competitivos. Nesse contexto, os equipamentos passaram a ser dimensionados no limite da necessidade do processo, com faixas operacionais mais estreitas (Siqueira, 2005). Concomitantemente, surge a necessidade de redução na probabilidade de falhas em produtos (sejam falhas que aumentam os custos associados aos produtos ou falhas que possam implicar em riscos sérios à segurança pública), o que resulta numa ênfase crescente em sua confiabilidade (Fogliatto & Ribeiro, 2011).

Gerir ativos no ramo da mineração requer em sua metodologia um planejamento adequado para um bom desempenho das operações e alta produtividade. Na economia atual de preços mais baixos das *commodities* e custos crescentes dentro do setor de mineração, as empresas olham para o futuro e consideram todo o ciclo de vida do desempenho de seus ativos e o custo total de propriedade.

O Brasil é um importante produtor e exportador de minérios de alta qualidade, grande teor de pureza e elevada taxa de produtividade. Para isso, segundo Mendes et al. (2014), para se suportar adequadamente essa cadeia se trabalham com sistemas produtivos que são constituídos essencialmente de equipamentos de médio e grande porte, com grande diversidade de operações e com exigências de desempenho. Portanto, manter esses equipamentos em funcionamento pelo máximo período possível se torna fundamental para quem busca a competitividade no mercado tão concorrido de produção mineral. Por este motivo, as empresas que empregam tempo e recursos para melhorar a eficiência de seus ativos garantem que suas instalações e equipamentos possam operar de forma confiável, e com isso tendem não apenas a sobreviver, mas também a prosperar no ambiente econômico atual, procurando produzir mais, com menos recursos e com maior velocidade, sendo estes desafios comuns para empresas que buscam permanecer no mercado (Santos, 2009).

Assim, torna-se importante o aumento da disponibilidade dos equipamentos, principalmente aqueles que apresentam maior criticidade e são mais importantes para o pleno funcionamento do sistema produtivo. Para isso, é essencial um bom planejamento de manutenção, já que um desempenho abaixo do esperado para as máquinas, manutenção ineficaz e tempos de manutenção corretiva não-planejada elevados levam ao aumento das perdas de produção, de mercado, de oportunidade, e redução de lucros, entre outras consequências indesejáveis.

No setor de mineração, as máquinas de pátio são equipamentos de grande porte responsáveis pelo empilhamento e recuperação do minério para carregamento em vagões e posterior transporte do minério ao destino. Esses equipamentos precisam apresentar elevada disponibilidade física uma vez que podem ocasionar gargalos no sistema produtivo. Isso torna importante a análise de eventos que podem vir a onerar o tempo de funcionamento pleno de tais máquinas. Diante dessa importância, qualquer máquina de pátio que apresente níveis de disponibilidade abaixo do padrão deve ser alvo de avaliação.

Em certa empresa de mineração, destacou-se uma recuperadora de minério de ferro, que no ano de 2020 era a mais nova e moderna dentre as máquinas de grande porte, porém, apresentava disponibilidade física aquém do que planejado, com meta anual de 83,81% e valores realizados de 71,36% no ano. Com o objetivo de sugerir ações preventivas eficientes foi estabelecido um estudo a fim de aumentar a disponibilidade física desse ativo.

Aumentar a disponibilidade física de uma máquina recuperadora de minério de ferro através da aplicação da ferramenta FMEA. Identificar os subsistemas mais críticos da recuperadora em termos do quantitativo de hora de manutenção corretiva e medir diferentes indicadores de manutenção, visando o acompanhamento histórico após a implementação do FMEA.

REFERENCIAL TEÓRICO

SETOR MINERAL BRASILEIRO E PARAENSE

No Brasil, as primeiras minas de ouro foram encontradas no final do século XVI no interior da região, atualmente Minas Gerais. A partir de então, essa região se tornou segmento fundamental para a prosperidade socioeconômica brasileira, contribuindo diretamente com a escalada financeira atual e futura, como vetor frontal de garantia de um mercado aquecido, com oferta de empregos, renda e qualidade de vida aos brasileiros.

O Brasil possui um dos maiores potenciais em recursos minerais do mundo com a exploração de 55 tipos diferentes de minerais. O ferro é o minério mais extraído no país, que detém cerca de 8% das reservas mundiais desse recurso (Eco4u, 2013). Segundo Rodrigues e Lengyel (2023), o comércio internacional de minério de ferro, especialmente nas relações entre Brasil e China, está diretamente associado ao crescimento econômico e ao desenvolvimento da infraestrutura, destacando a relevância dessa commodity para as economias envolvidas.

Nessa mesma linha, dados do IBRAM (2024) mostram que a China responde por aproximadamente 74% das importações globais de minério de ferro, sendo abastecida majoritariamente pela Austrália e pelo Brasil, o que evidencia a importância estratégica do setor mineral para países em desenvolvimento e grandes exportadores, como Austrália, Brasil, Índia e China.

Segundo a Agência Nacional de Mineração (ANM, 2020), o estado do Pará foi o estado que mais arrecadou recursos da Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM), representando 51,19% de recolhimento do recurso no Brasil durante o ano de 2020, com um montante de R\$ 3,112 bilhões. Essa arrecadação representa o crescimento de 41,95% em relação ao ano de 2019, quando o Estado arrecadou R\$ 2,192 bilhões. Isso implica em mais recursos disponíveis para que o Estado e os municípios promovam melhorias nos setores de saúde e educação, por exemplo.

MANUTENÇÃO

Segundo a ABNT (NBR 5462: 1994) a manutenção pode ser definida como a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, que são destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual seja possível ao mesmo desempenhar qualquer função a ele requerida. Assim sendo, a manutenção tem por objetivo garantir o funcionamento e a disponibilidade dos equipamentos e maquinários, além de proporcionar uma melhor vida útil. Através das atividades de manutenção é possível ter o controle de falhas e o reabastecimento do ativo ao processo produtivo.

TIPOS DE MANUTENÇÃO

Destacam-se a preventiva, corretiva e preditiva. A manutenção preventiva é realizada antes da falha do equipamento, visando evitar quebras e reduzir custos operacionais. A manutenção corretiva ocorre após a falha, podendo ser planejada ou não planejada, conforme a criticidade do equipamento. Já a manutenção preditiva utiliza técnicas de monitoramento para avaliar as condições do equipamento e prever falhas iminentes, permitindo intervenções mais precisas e oportunas (ABNT, 1994).

ANÁLISE DE MODO E EFEITO DE FALHA

Segundo as descrições presentes na literatura, a Análise de Modo e Efeito de Falha (FMEA) originou-se nos procedimentos militares dos Estados Unidos na década de 1940, por meio do documento MIL-P-1629, com o propósito de avaliar falhas em equipamentos militares em função da missão e da segurança de pessoal ou material. Além disso, Stamatis (2003) ressalta que essa metodologia é aplicada a produtos e processos para identificar antecipadamente possíveis modos de falha, seus efeitos e causas, permitindo priorizar ações preventivas em vez de esperar pela ocorrência de falhas.

Para a aplicação da metodologia FMEA, torna-se necessário o conhecimento do conceito de falha. Segundo a ABNT (NBR 5462:1994), a falha consiste no “término da capacidade de um item desempenhar a função requerida”, que, por sua vez, é uma função ou combinação de funções de um item que são consideradas necessárias para prover um dado serviço.

De acordo com Fogliatto e Ribeiro (2011), o uso da FMEA proporciona diversas vantagens, como o suporte na avaliação de alternativas de projeto, a ampliação do conhecimento dos engenheiros sobre aspectos de qualidade e confiabilidade, a priorização de ações de melhoria, a adaptação de projetos para facilitar manufatura e montagem, além de oferecer um formato de análise que permite rastrear recomendações e auxiliar na implementação de alterações futuras.

Fernandes (2005) complementa dizendo que “o método FMEA, busca além de identificar as falhas potenciais de forma sistemática, identificar os seus efeitos e definir ações que visem reduzir ou eliminar os riscos associados a esta falha, reduzindo assim o risco do produto ou processo”, avaliando a severidade das falhas, a forma como as mesmas podem ocorrer e como poderiam ser detectadas antes de levarem a reclamações do cliente ou incidentes de maior escala. Assim, com base em três quesitos (severidade “S”, ocorrência “O” e detecção “D”), a FMEA prioriza os modos de falha que geram maior risco ao sistema (Quadro 1).

Quadro 1. Tabela FMEA padrão a ser utilizada no trabalho

FMEA			Data da Emissão: 01/01/2024 - Última Revisão: DD/MM/AAAA						
Manutenção			Responsável: xxxxxxxx						
Revisão: 001			Conjunto: recuperadora de minério de ferro				Mecânica		
Ponto da Falha			Participantes: supervisores de manutenção preventiva e corretiva mecânica, hidráulica, elétrica e instrumentação, operação depátio, técnicos de manutenção mecânica e elétrica						
			Análise da Falha			Avaliação de Risco			
Equipamento	Função do Equipamento	Subsistema	Modos de Falha	Efeito da Falha	Causa da Falha	S	O	D	NPR
Recuperadora de minério	Recuperar minério de ferro a uma velocidade de 3,7 m/s, com taxa de 12.000 tons/h	Descrição da função do conjunto	Modo de falha	Efeito 1	Causa 1	1	2	3	6
				Efeito 2	Causa 2	1	2	1	2
				Efeito 3	Causa 3	2	3	2	12

Fonte: Autores (2025).

CABEÇALHO

Fogliatto e Ribeiro (2011) indicam que existem particularidades em cada empresa, contendo o número da FMEA, identificação do item, modelo ao qual ele corresponde, dados dos participantes e a data do documento.

ITEM OU FUNÇÃO

Após preencher o cabeçalho, inicia-se o registro das colunas da planilha de FMEA, que detalha o item em análise e seus componentes. Por sua vez, as primeiras colunas descrevem o item e sua função, podendo incluir níveis adicionais, como sistema, subsistema, conjunto e componente, conforme a complexidade do equipamento.

MODOS POTENCIAIS DE FALHA

Corresponde às formas pelas quais um item pode deixar de atender aos requisitos do projeto. Devem ser listados todos os modos de falha com probabilidade diferente de zero, incluindo aqueles que ocorrem apenas em condições específicas, como, por exemplo, temperaturas muito baixas ou terrenos acidentados.

EFEITOS POTENCIAIS DE FALHA

Conforme Menčík (2016) e Fogliatto e Ribeiro (2011), os modos de falha em processos ou produtos são identificados como maneiras pelas quais algo pode falhar, e seus efeitos são entendidos como os defeitos ou prejuízos percebidos pelo cliente. Em geral, cada modo de falha produz um único efeito, embora existam casos em que um modo cause múltiplos efeitos.

CAUSAS OU MECANISMOS POTENCIAIS DE FALHA

De acordo com Stamatis (2003) correspondem a deficiências de projeto ou processo que originam os modos de falha, podendo ser controladas ou eliminadas. Sempre que possível, todas as causas ou mecanismos potenciais de falhas com probabilidade significativa de ocorrência devem ser identificados e registrados.

SEVERIDADE (S)

Corresponde à gravidade do efeito da falha. Importante destacar que, como a FMEA utiliza critérios qualitativos, o estudo pode ser realizado mesmo na ausência de medições ou análises matemáticas mais aprofundadas (Tabela 1).

Tabela 1. Escala para avaliação dos efeitos dos modos de falha

Severidade	Critério de severidade do efeito	Escala
Muito alta	Quando compromete a segurança da operação ou envolve infração a regulamentos governamentais	9 a 10
Alta	Quando provoca alta insatisfação do cliente, por exemplo, um veículo ou aparelho que não opera, sem comprometer a segurança ou implicar infração	7 a 8
Moderada	Quando provoca alguma insatisfação, devido à queda do desempenho ou mau funcionamento de partes do sistema	5 a 6
Baixa	Quando provoca uma leve insatisfação, o cliente observa apenas uma leve deterioração ou queda no desempenho	3 a 4
Mínima	Falha que afeta minimamente o desempenho do sistema, e a maioria dos clientes talvez nem mesmo note sua ocorrência	1 a 2

Fonte: Fogliatto e Ribeiro (2011).

OCORRÊNCIA (O)

Stamatis (2003) relata a ocorrência como à frequência com que uma causa identificada pode resultar em falha. Assim, a equipe responsável pela FMEA deve realizar uma avaliação em escala de 1 a 10 para classificar a probabilidade de ocorrência (Tabela 2). Quando dados quantitativos não estiverem disponíveis, cabe à equipe avaliar qualitativamente a ocorrência.

Tabela 2. Escala para avaliação da ocorrência da causa de falha em processos

Probabilidade de Ocorrência	Critério de ocorrência de falha	Escala
Muito alta	Falhas quase inevitáveis	9 a 10
Alta	Falhas ocorrem com frequência	7 a 8
Moderada	Falhas ocasionais	5 a 6
Baixa	Falhas raramente ocorrem	3 a 4
Mínima	Falhas muito improváveis	1 a 2

Fonte: Fogliatto e Ribeiro (2011).

DETECÇÃO (D)

Juran (2018) descreve que a detecção é a capacidade dos controles em identificar falhas antes que elas ocorram, sendo avaliada em uma escala de 1 a 10, onde 1 representa alta probabilidade de detecção e 10, baixa probabilidade. E para reduzir a pontuação é necessário melhorar os controles de prevenção e detecção presentes no processo. O critério de avaliação deve ser definido por consenso e, então, utilizado consistentemente.

Os critérios utilizados para avaliação da detecção nos processos produtivos, em que, os valores mais baixos (1 a 3) estão associados ao uso de dispositivos ou procedimentos à prova de erro, por sua vez, os valores intermediários (4 a 6) estão associados ao uso de medições ou controle estatístico, enquanto, os valores mais altos (7 a 10) estão associados à inspeção visual, inspeções aleatórias ou mesmo inexistência de controle (Tabela 3).

Tabela 3. Escala para avaliação da detecção em processos

Detecção	Critério de probabilidade de detecção pelo sistema de controle	Escala
Muito Remota	Os controles não irão detectar o defeito, ou não existem controles	10
Remota	Os controles provavelmente não irão detectar o defeito	8 a 9
Baixa	Há uma baixa probabilidade de os controles detectarem o defeito	6 a 7
Moderada	Os controles podem detectar o defeito	4 a 5
Alta	Há uma alta probabilidade de os controles detectarem o defeito	2 a 3
Muito Alta	É quase certo que os controles irão detectar o defeito	1

Fonte: Fogliatto e Ribeiro (2011).

NÚMERO DE PRIORIDADE DE RISCO (NPR)

É calculado para priorizar as ações de correção e melhoria do processo. No cálculo, as notas associadas a cada aspecto avaliada (severidade, ocorrência e detecção) são multiplicadas entre si para chegar a índice final, Equação 1.

$$NPR = S \times O \times D \quad (1)$$

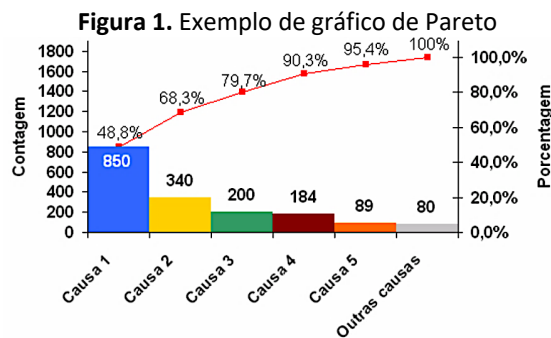
Apesar de útil para promover uma priorização que possibilite a concentração nos itens de maior risco, Ben-Daya et al. (2009) advertem que a análise do NPR tem duas limitações: a) Diferentes conjuntos de severidade, ocorrência e detecção podem produzir o mesmo NPR, embora as implicações de risco possam ser totalmente diferentes; b) Severidade, ocorrência e detecção recebem a mesma importância (peso) nos cálculos de NPR.

AÇÕES RECOMENDADAS

Fogliatto e Ribeiro (2011) enfatizam que, “uma vez que os modos de falha tenham sido priorizados através do risco, as ações recomendadas devem se dirigir aos itens com maior risco”. O objetivo das ações sugeridas é diminuir a gravidade, a frequência ou a não-detecção de problemas. Independentemente do nível de risco, as causas que comprometem a segurança dos operadores devem ser eliminadas ou controladas por meio de dispositivos de proteção. É importante completar as ações recomendadas, pois todo o esforço da FMEA terá pouco valor se as ações recomendadas não forem efetuadas. É responsabilidade de todos os participantes da equipe fornecerem o acompanhamento necessário à concretização das ações recomendadas.

DIAGRAMA DE PARETO

Gráfico de barras construído a partir da coleta de dados, utilizado para priorizar problemas ou causas de um determinado tema. Criado pelo economista italiano Vilfredo Pareto no século XIX, ele observou que 20% da população detinha 80% da riqueza, enquanto os 80% restantes possuíam apenas 20%, conceito conhecido como regra 80/20. A análise da porcentagem acumulada ajuda a focar nos itens de maior risco, independentemente do valor absoluto. No contexto da FMEA, o diagrama de Pareto serve para priorizar subsistemas, classificar causas potenciais e definir soluções (Figura 1).

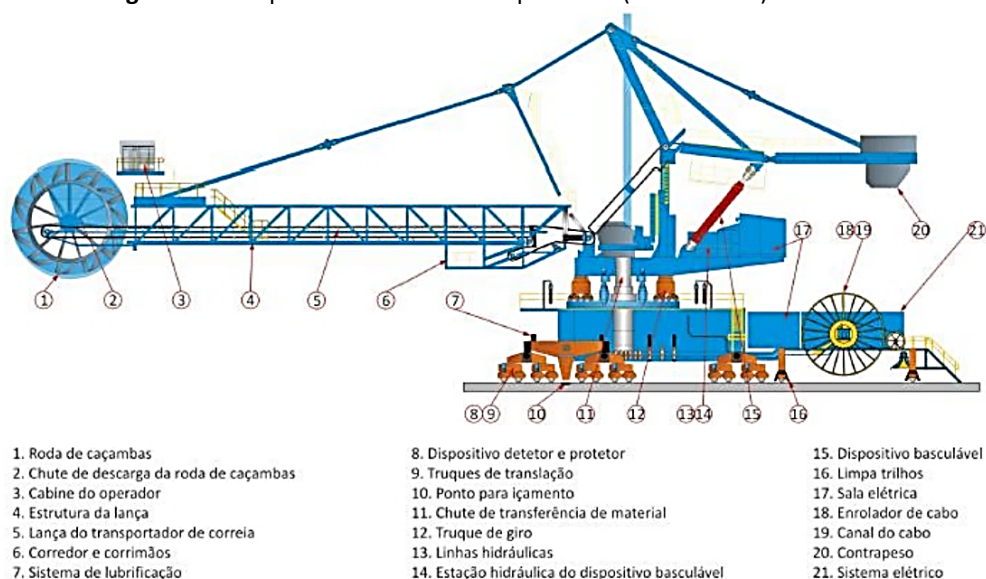


Fonte: Aguiar (2002)

RECUPERADORA OU RETOMADORA DE MINÉRIO

No beneficiamento do minério a armazenagem do produto é realizada nos pátios de estocagem por meio de pilhas. Para o processo de manuseio do minério são utilizadas as máquinas de pátio, sendo uma delas a recuperadora de minério. A recuperadora ou retomadora trabalha recuperando ou retomando minério de ferro dos pátios de estocagem, funcionando interligada com uma correia transportadora conectado aos vagões e pode ser montada sobre esteiras ou trilhos. Também, a recuperadora translada ao longo dos pátios de produto e captura o minério por meio das caçambas que estão acopladas numa roda no extremo da lança, direcionando material até as correias transportadoras que seguirão os circuitos de carregamento até os vagões dos trens. Assim, (Figura 2) a recuperadora tem 5 sistemas principais: ancoragem, translação, lança, elevação e giro.

Figura 2. Principais estruturas da recuperadora (retomadora) de minério



Fonte: Vale (2021).

DISPONIBILIDADE FÍSICA (DP)

Segundo a ABNT (NBR 5462:1994) disponibilidade é a “capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado”. A fórmula do cálculo podendo variar de acordo com a empresa e o setor produtivo (Viana, 2002). Um dos possíveis cálculos de disponibilidade física (DF), Equação 2.

$$DF(\%) = \left[\frac{HC - HM}{HC} \right] \times 100 \quad (2)$$

Onde:

HC = Horas de Calendário (considerando sempre 24h); e HM = Horas de Manutenção Totais Para Viana (2002), a DF é um dos índices mais importantes, já que este é o principal produto da manutenção. Além disso, a disponibilidade pode ser utilizada para identificar os equipamentos que são problemas, aqueles que diminuem a DF da planta.

METODOLOGIA

A abordagem utilizada foi a qualiquantitativa, já que combinou técnicas qualitativas e quantitativas para uma análise mais abrangente e profunda dos dados. Qualitativa no que tange a definição das principais causas potenciais e efeitos das falhas, assim como na escolha de critérios para definir os graus de severidade, ocorrência e detecção. E quantitativa em termos da análise das horas de manutenção e dos indicadores de desempenho.

Vale observar que a FMEA se apoia no conhecimento da equipe, sendo a qualidade da análise proporcional ao conhecimento acumulado pela equipe. Portanto, dois aspectos contribuem para a FMEA gerar resultados consistentes: (i) o trabalho em equipe, que permite somar conhecimentos e (ii) o trabalho sistemático que contribui para garantir que todos os elementos serão considerados. Para seguir essa lógica sistemática da metodologia FMEA, as seguintes etapas típicas indicadas por Ben-Daya et al. (2009) foram conduzidas:

- a) Seleção de um equipamento de alto risco;
- b) Definição da equipe;
- c) *Brainstorming* de causas em potencial;
- d) Identificação das causas raiz dos modos de falha;
- e) Levantamento dos efeitos potenciais das causas;
- f) Atribuição das classificações de severidade, ocorrência e detecção para cada causa;
- g) Cálculo do número de prioridade de risco (NPR) para cada causa;
- h) Priorização das causas de falha para ação usando NPR;
- i) Definição de medidas para eliminar ou reduzir as causas de falha de alto risco.

Assim, uma coleta de dados foi realizada antes da etapa de brainstorming para facilitar a análise da equipe. Os principais subsistemas da máquina serão priorizados ordenados pela quantidade de horas corretivas que cada subsistema representa para o todo, segundo a ferramenta da qualidade diagrama de Pareto a ser plotado. A partir dessas informações será possível definir os modos de falha, causas potenciais e efeitos das falhas dos subsistemas priorizados, bem como atribuir as notas correspondentes às classificações de severidade, ocorrência e detecção seguindo os critérios, já evidenciados, (Tabelas 1 a 3).

Na sequência, valores de NPR serão calculados para cada causa em potencial e, para melhor estabelecer uma ordem das causas de perdas que devem ser sanadas prioritariamente, um novo Diagrama de Pareto será utilizado. Nessa etapa, um gráfico de barras será plotado em ordem decrescente visando identificar os problemas de maiores notas e concentrar os esforços para saná-los, organizados por subsistema da máquina. Após a análise dos modos de falha e suas causas, as ações de manutenção preventiva, corretiva ou preditiva adequadas para mitigar ou eliminar os riscos identificados serão traçadas.

SELEÇÃO DE UM EQUIPAMENTO DE ALTO RISCO

A metodologia proposta será aplicada somente a uma das recuperadoras localizada no pátio de estocagem. Não serão considerados outros sistemas ou equipamentos do complexo. A análise será constituída com base no histórico de falhas do ano de 2020. A recuperadora foco deste trabalho é do tipo “roda de caçambas”, um equipamento eletromecânico utilizado para a recuperação do minério a partir das pilhas de produtos formadas. A recuperadora é ajustada para operar de forma contínua e tem capacidade de 12.000 t/h. A velocidade do transportador da lança é de 3,7 m/s e a correia transportadora da lança da máquina tem 1.800 mm de largura. O material transportado pela recuperadora é minério de ferro e possui densidade aparente de 2,4 tons./m³.

DEFINIÇÃO DA EQUIPE

Composta por profissionais de diversas especialidades de manutenção (mecânica, hidráulica, elétrica e automação) e operação: 1 coordenador de controle operacional; 2 engenheiros de confiabilidade operacional; 1 supervisor de manutenção mecânica e 1 de manutenção elétrica; 1 supervisor de operação e 1 de manutenção hidráulica; 1 supervisor de automação; 1 engenheiro de manutenção mecânica e 1 de manutenção elétrica; 2 técnicos especializados em manutenção elétrica e instrumentação e 1 em manutenção mecânica; 3 técnicos especializados de produção e 2 de planejamento e programação mecânica; e 1 técnico especializado de planejamento e programação elétrica.

COLETA DE DADOS

Antes de iniciar o estudo das causas em potencial, todas informações relevantes sobre o equipamento foram reunidas. Incluindo dados técnicos, histórico de manutenção, relatórios de falhas anteriores e qualquer outra documentação disponível. Assim, para facilitar a identificação das causas potenciais dos modos de falha, inicialmente foi conduzida uma coleta de dados, que consistiu no mapeamento de todas as falhas de origem corretiva ocorridas no ano de 2020. A fonte de dados foi o sistema oficial da empresa para cadastro de falhas, sistema onde todas as falhas são apontadas em tempo real pela equipe do centro de controle operacional e ficam disponíveis para consulta por meio de relatórios emitidos diretamente, em tempo real, pelo sistema. Já falhas com menos de 5 minutos foram classificadas como micro paradas e não constituem a base de dados do referido estudo (Tabela 4).

Tabela 4. Horas paradas por manutenção corretiva de cada subsistema

Subsistema	Horas absolutas
Acoplamento - transportador de correia	0,4722
Cabo de aço - elevação da lança	1,4306
Cabo e fiação	42,8517
Chute de alimentação	8,2039
Cilindro - elevação da lança	0,6789
Componentes de comando, proteção, controle e medição	161,6306
Correia	69,4269
Freio - translação da máquina	0,1950
Garra trilho	1,6003
Inversor / Conversor / Soft starter	31,5250
Lubrificação centralizada	6,2150
Lubrificação centralizada - elevação da lança	0,8061
Lubrificação centralizada - roda de caçamba	25,5486
Lubrificação centralizada - translação	1,2247
Motor acionamento	4,2806
Motor elétrico - truque de translação	3,1147
Painel elétrico (CCM, gaveta, força, comando etc.)	72,0319
PLC e Remota	0,5000
Proteções	8,1572
Rede Automação	0,8711
Redutor - roda de caçamba	0,1250
Roda de caçamba	41,7492
Sistema de iluminação	0,1206
Supervisório	2,8439
Tambor	2,2289
Tambor de Acionamento	4,8783
Tambor de desvio	2,9758
Transportador de correia	36,7742
Unidade Hidráulica	37,5339
Unidade hidráulica - elevação da lança	0,6856

Fonte: GPVM - Sistema de gestão de produção da empresa (2021).

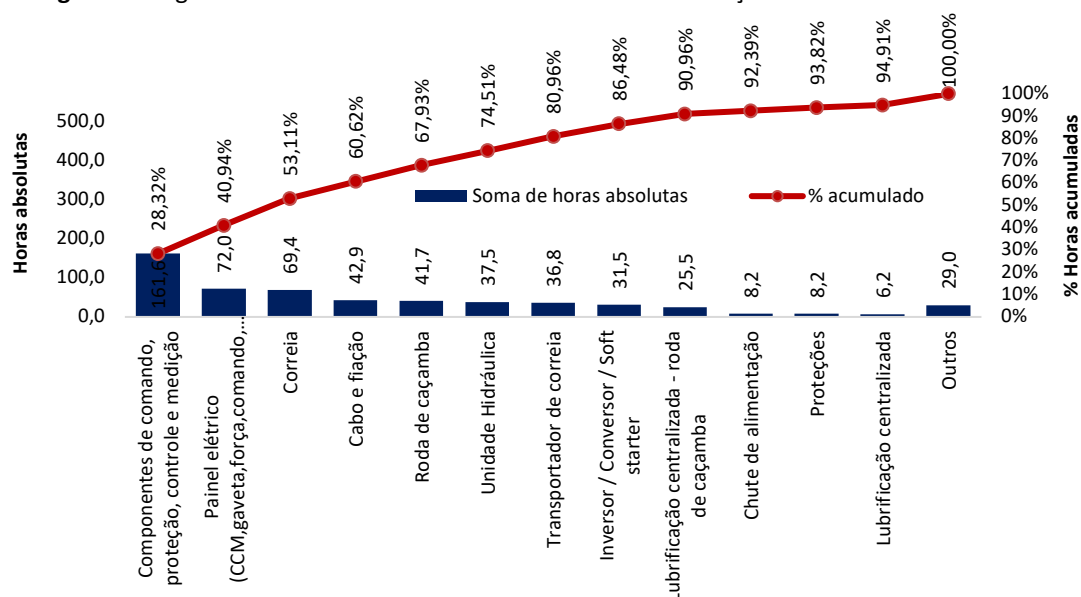
INDICADORES DA MANUTENÇÃO

Para quantificar a eficiência e eficácia das ações recomendadas pela FMEA ao longo dos anos, um conjunto de indicadores de manutenção foi empregado. Os indicadores escolhidos são: horas de calendário (HC), as horas de manutenção (HM) e a disponibilidade física (DF), sendo que as horas de manutenção totais foram quantificadas pela soma das horas de manutenção preventiva (HMP) com as horas de manutenção corretiva (HMC) para cada período de 1 ano.

PRIORIZAÇÃO DOS SUBSISTEMAS

Em princípio, uma classificação foi realizada para que os subsistemas mais críticos em termos das horas em manutenção corretiva fossem priorizados. Para isso, os dados da Tabela 4 foram plotados na forma de um Diagrama de Pareto (Figura 3). A equipe de implementação do FMEA priorizou, segundo o Diagrama de Pareto, os sistemas que representavam um percentual acumulado de até 80% do tempo em manutenção corretiva. Subsistemas com menos de 5,0h de manutenção corretiva estão representados em “Outros”. Assim, o foco do FMEA incidiu sobre os subsistemas: (I) componentes de comando, proteção, controle e medição; (II) painel elétrico (CCM, gaveta, força, comando etc.); (III) correia; cabo e fiação; (IV) roda de caçamba; unidade hidráulica; e (V) transportador de correia.

Figura 3. Diagrama de Pareto em termos das horas em manutenção corretiva dos subsistemas



Fonte: Autores (2025).

META DE INDICADORES NO PERÍODO

Importante enfatizar que ao longo do ano, existem horas de manutenção corretiva orçadas e programadas para cada subprocesso da planta, ou seja, já é esperado que equipamentos falhem por algum motivo desconhecido (Tabela 5).

Tabela 5. Programa de tempo manutenção corretiva para cada subprocesso da planta (Calendário mês)

Subprocesso	% Corretiva
Carregamento	5
Recuperação 1	7
Recuperação 2	10
Estocagem Empilhamento 1	5
Estocagem Circuito 1	5
Estocagem Empilhamento 2	5
Estocagem Circuito 2	5
Expedição	7
Pátio E	5
REP 3	4
REP 5	4

Fonte: Autores (2025).

A recuperadora em questão compõe o subprocesso denominado “Recuperação 1”. Constata-se que o tempo de hora de manutenção corretiva máximo programado para esse subprocesso correspondeu a 7% do total de horas de calendário do mês, ou seja, caso a recuperadora não tenha programação de parada preventiva para um determinado mês, a meta a ser alcançada de DF foi de 93,0%. Estas metas são compostas pela soma das parcelas de horas de manutenção preventiva e corretiva em relação ao tempo total de horas de calendário do mês. Pela análise, percebe-se que existem horas de manutenção preventiva programadas em todos os meses do ano, já que sempre seus valores foram inferiores a 93,0%. Desta forma, a previsão média do ano 2020 de DF da recuperadora foi de 83,81% (Tabela 6).

Tabela 6. Programa de DF da recuperadora para o ano de 2020

Mês	DF
Janeiro	86,00%
Fevereiro	86,59%
Março	86,00%
Abril	86,80%
Maio	86,00%
Junho	83,70%
Julho	84,00%
Agosto	80,38%
Setembro	85,77%
Outubro	77,00%
Novembro	77,50%
Dezembro	86,00%

Fonte: Autores (2025).

RESULTADOS

IDENTIFICAÇÃO DOS MODOS DE FALHA, SEUS EFEITOS E CAUSAS POTENCIAIS

As Tabelas 7 a 13 indicam modos de falha, seus efeitos e causas potenciais definidas durante *brainstorming* da equipe multidisciplinar, compondo a FMEA para cada um dos 7 subsistemas priorizados, com base na vivência e histórico existentes na máquina e em outras semelhantes.

Tabela 7. Modos de falha, efeitos e causas potenciais vistas para componentes (comando, proteção, controle, medição)

Modo de Falha	Efeito	Nº	Causas de Falha
Falha chave de desalinhamento	Parada da correia da lança da máquina	1	Acúmulo de material
	Parada da correia da lança da máquina	2	Componentes irregulares (rolos, tambores, limpadores, cavaletes, chutes)
	Parada da correia da lança da máquina	3	Correia (emenda, tiras, bolhas, trincas, desgaste da borda)
	Parada da correia da lança da máquina	4	Mal contato
Falha enrolador de cabo	Parada devido cabo de alimentação frouxo ou esticado	5	Dessincronização do sistema de engrenagens do enrolador de cabos
	Parada devido cabo posicionado fora do bandejamento	6	Cabo frouxo
Falha sensor de posição	Desarme do sistema elétrico da máquina	7	Falha no inversor
	Perda na capacidade dos movimentos de elevação da máquina	8	Falha no sistema de elevação
	Perda de capacidade de enrolar o cabo de alimentação	9	Enrolador de cabos
Freio	Desarme do sistema elétrico da máquina	10	Desarme do disjuntor
	Perda de capacidade de giro da máquina	11	Queima do freio do motor de giro

Tabela 8. Modos de falha, efeitos e causas potenciais vistas para painel elétrico (CCM, gaveta, força, comando)

Modo de Falha	Efeito	Nº	Causas de Falha
Falha de comunicação	Parada da máquina devido ausência de comunicação	12	Falha na rede Devicenet
	Desarme do sistema eletromecânico da máquina	13	Defeito no motor elétrico
Mal contato	Desarme do sistema elétrico da máquina	14	Falha na placa de interface do encoder do motor do enrolador de cabos
	Desarme do sistema elétrico da máquina	15	Disjuntor de freio desarmado
Proteção atuada	Desarme do sistema eletromecânico da máquina	16	Desarme da bomba UH roda de caçamba
	Desarme do sistema elétrico da máquina	17	Relé em falha devido aquecimento
	Desarme do sistema elétrico da máquina	18	Falha no Inversor
	Desarme do sistema eletromecânico da máquina	19	Falha na bomba da roda de caçamba
	Desarme do sistema eletromecânico da máquina	20	Falha no freio do giro

Desarme do sistema eletromecânico da máquina	21	Falha no relé térmico do motor da lança
Desarme do sistema eletromecânico da máquina	22	Falha no sistema de lubrificação
Desarme do sistema elétrico da máquina	23	Bobina do freio queimada
Desarme do sistema eletromecânico da máquina	24	Sobrecarga na bomba de elevação

Tabela 9. Modos de falha, efeitos e causas potenciais identificadas para correia

Modo de Falha	Efeito	Nº	Causas de Falha
Defeito emenda	Parada da correia da lança da máquina	25	Componentes irregulares (rolos, tambores, limpadores, cavaletes, chutes)
	Parada da correia da lança da máquina	26	Defeito emenda
Rompimento	Parada da correia da lança da máquina	27	Componentes irregulares (rolos, tambores, limpadores, cavaletes, chutes)

Tabela 10. Modos de falha, efeitos e causas potenciais identificadas para cabo e fiação

Modo de Falha	Efeito	Nº	Causas de Falha
Mal contato	Parada no sistema de translação da máquina	28	Cabo de translação frouxo
	Desarme do sistema eletromecânico da máquina	29	Cabo de translação esticado
	Desarme do sistema elétrico da máquina	30	Defeito no enrolador de cabo
Rompimento	Parada da máquina devido ausência de comunicação	31	Rompimento da fibra de comunicação

Tabela 11. Modos de falha, efeitos e causas potenciais identificadas para roda de caçamba

Modo de Falha	Efeito	Nº	Causas de Falha
Avaria na caçamba	Parada da roda de caçamba da máquina	32	Pino da caçamba quebrado
Defeito ou falha no rolamento	Parada da roda de caçamba da máquina	33	Defeito no rolamento
Vazamento	Parada da roda de caçamba da máquina	34	Vazamento em conexões e sistema de vedação

Tabela 12. Modos de falha, efeitos e causas potenciais identificadas para unidade hidráulica

Modo de Falha	Efeito	Nº	Causas de Falha
Defeito ou Falha	Parada do equipamento devido lubrificação	35	Falha na unidade hidráulica roda de caçamba
	Perda de capacidade de giro da máquina	36	Vazamento no giro
	Desarme do sistema eletromecânico da máquina	37	Chute móvel perdendo sinal, devido ao vazamento do cilindro de elevação
	Perda de capacidade de movimentação do chute	38	Cilindro do chute de alimentação travado
	Parada da roda de caçamba da máquina	39	Falha na bomba do redutor da roda de caçambas
	Parada da roda de caçamba da máquina	40	Perda de pressão no sistema hidráulico da roda de caçambas
	Desarme do sistema eletromecânico da máquina	41	Sobrecarga na bomba hidráulica

Tabela 13. Modos de falha, efeitos e causas potenciais identificadas para transportador de correia

Modo de Falha	Efeito	Nº	Causas de Falha
Desalinhamento da correia	Parada da correia da lança da máquina	42	Defeito emenda
	Parada da correia da lança da máquina	43	Componentes irregulares (rolos, tambores, limpadores, cavaletes, chutes)
Quebra dos roletes de carga	Parada da correia da lança da máquina devido chave de emergência ou detector de rasgo da correia	44	Fabricação, topografia, fim de vida útil
Quebra dos roletes de retorno	Parada da correia da lança da máquina devido chave de emergência ou detector de rasgo da correia	45	Fabricação, topografia, fim de vida útil
Rasgo na correia	Parada da correia da lança da máquina devido chave de emergência ou detector de rasgo da correia	46	Defeito emenda
	Parada da correia da lança da máquina devido chave de emergência ou detector de rasgo da correia	47	Componentes irregulares (rolos, tambores, limpadores, cavaletes, chutes)

Fonte: Autores (2025).

NÚMERO DE PRIORIDADE DE RISCO (NPR) E PRIORIZAÇÃO DAS CAUSAS EM POTENCIAL

As Tabelas 14 a 20, a severidade (S), ocorrência (O), detecção (D) e nota prioridade de risco (NPR), atribuídas no *brainstorming* multidisciplinar, avaliando critérios (Tabelas 1 a 3 - Fogliatto & Ribeiro, 2011), em cada causa potencial (Tabelas 5 a 11), de cada subsistema, vendo vivência da equipe e histórico de falhas ocorridas na máquina e em outras semelhantes.

Tabela 14. Notas (S), (O), (D) e (NPR) para causas do subsistema componentes de comando, proteção, controle e medição

Nº	Causa da Falha	S	O	D	NPR
1	Acúmulo de material	4	7	2	56
2	Componentes irregulares (rolos, tambores, limpadores, cavaletes, chutes)	7	5	3	105
3	Correia (emenda, tiras, bolhas, trincas, desgaste da borda)	6	5	3	90
4	Mau contato	5	3	2	30
5	Dessincronização do sistema de engrenagens do enrolador de cabos	7	3	6	126
6	Cabo frouxo	7	6	4	168
7	Falha no inversor	7	4	3	84

8	Falha no sistema de elevação	5	5	2	50
9	Enrolador de cabos	7	4	3	84
10	Desarme do disjuntor	7	6	3	126
11	Queima do freio do motor de giro	8	3	3	72

Tabela 15. Notas (S), (O), (D) e (NPR) para causas do subsistema Painel elétrico (CCM, gaveta, força, comando etc.)

Nº	Causa da Falha	S	O	D	NPR
12	Falha na rede devicenet	7	7	2	98
13	Defeito no motor elétrico	6	6	2	72
14	Falha na placa de interface do encoder do motor do enrolador de cabos	6	3	5	90
15	Disjuntor de freio desarmado	5	4	3	60
16	Desarme da bomba UH roda de caçamba	5	5	2	50
17	Relé em falha devido aquecimento	5	5	3	75
18	Falha no Inversor	7	4	3	84
19	Falha na bomba da roda de caçamba	7	5	2	70
20	Falha no freio do giro	6	5	2	60
21	Falha no relé térmico do motor da lança	5	5	3	75
22	Falha no sistema de lubrificação	6	5	2	60
23	Bobina do freio queimada	6	4	5	120
24	Sobrecarga na bomba de elevação	6	5	3	90

Tabela 16. Notas (S), (O), (D) e (NPR) para causas do subsistema correia

Nº	Causa da Falha	S	O	D	NPR
25	Componentes irregulares (rolos, tambores, limpadores, cavaletes, chutes)	7	4	3	84
26	Defeito emenda	10	3	2	60
27	Componentes irregulares (rolos, tambores, limpadores, cavaletes, chutes)	10	3	3	90

Tabela 17. Notas (S), (O), (D) e (NPR) para causas do subsistema cabo e fiação

Nº	Causa da Falha	S	O	D	NPR
28	Cabo de translação frouxo	5	5	3	75
29	Cabo de translação esticado	5	5	3	75
30	Defeito no enrolador de cabo	7	6	3	126
31	Rompimento da fibra de comunicação	7	3	2	42

Tabela 18. Notas (S), (O), (D) e (NPR) para causas do subsistema roda de caçamba

Nº	Causa da Falha	S	O	D	NPR
32	Pino da caçamba quebrado	7	6	6	252
33	Defeito no rolamento	7	6	5	210
34	Vazamento em conexões e sistema de vedação	7	6	4	168

Tabela 19. Notas (S), (O), (D) e (NPR) para causas do subsistema unidade hidráulica

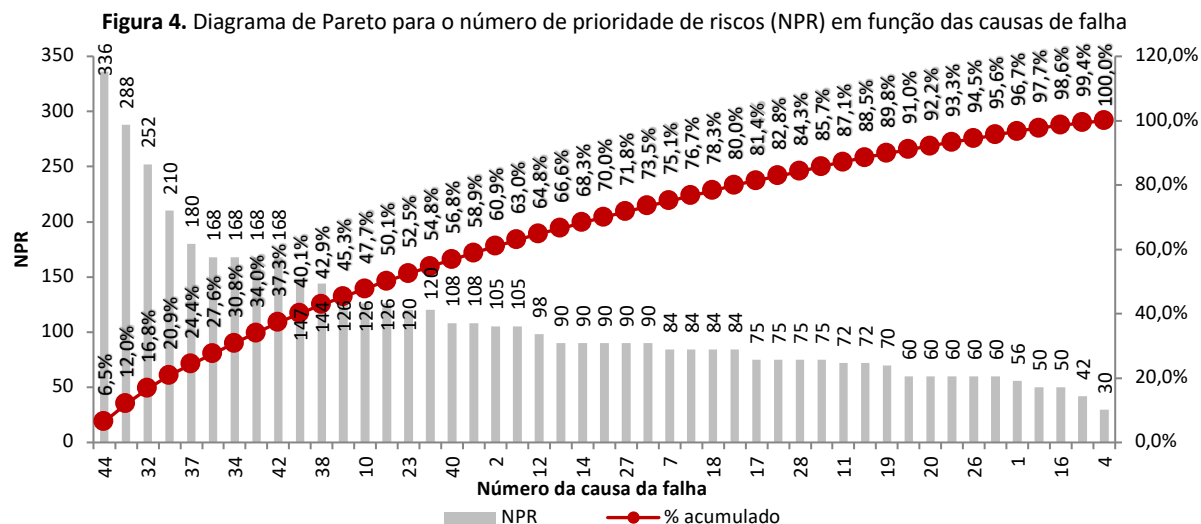
Nº	Causa da Falha	S	O	D	NPR
35	Falha na unidade hidráulica roda de caçamba	7	6	4	168
36	Vazamento no giro	6	5	4	120
37	Chute móvel perdendo sinal, devido ao vazamento do cilindro de elevação	6	5	6	180
38	Cilindro do chute de alimentação travado	6	4	6	144
39	Falha na bomba do redutor da roda de caçambas	7	5	3	105
40	Perda de pressão no sistema hidráulico da roda de caçambas	6	6	3	108
41	Sobrecarga na bomba hidráulica	6	6	3	108

Tabela 20. Notas (S), (O), (D) e (NPR) para causas do subsistema transportador de correia

Nº	Causa da Falha	S	O	D	NPR
42	Defeito emenda	7	6	4	168
43	Componentes irregulares (rolos, tambores, limpadores, cavaletes, chutes)	7	7	3	147
44	Fabricação, topografia, fim de vida útil	8	7	6	336
45	Fabricação, topografia, fim de vida útil	8	6	6	288
46	Defeito emenda	10	3	2	60
47	Componentes irregulares (rolos, tambores, limpadores, cavaletes, chutes)	10	3	3	90

Fonte: Autores (2025).

Após, medidas corretivas associadas a cada uma das 47 causas em potencial, foram sugeridas para serem implementadas. Contudo, outro Digrama de Pareto foi plotado, dessa vez para priorizar as causas de acordo com a criticidade do NPR, visando resolver mais rapidamente aquelas que obtiveram as maiores notas. A causa potencial 44 (fabricação, topografia, fim de vida útil), por exemplo, que está associada ao modo de falha “quebra dos roletes de carga” pertencente ao subsistema “transportador de correia”, é a classificada com o maior nível de criticidade, devendo ser priorizada durante a execução de medidas corretivas (Figura 4).



Fonte: Autores (2025).

AÇÕES PARA ELIMINAR OU REDUZIR AS CAUSAS DE FALHA

Foram definidas qualitativamente ações para as 47 causas identificadas (Tabelas 21 a 27).

Tabela 21. Ações de eliminar ou reduzir causas de falha em potencial identificadas para componentes de comando, proteção, controle e medição

Nº	Causa da Falha	Ações de manutenção
1	Acúmulo de material	Realizar inspeções detalhadas pela manutenção e operação para mapear os pontos de fuga de material, identificar a causa raiz e inserir no mapa de manutenção o saneamento do ponto de fuga de material
2	Componentes irregulares (rolos, tambores, limpadores, cavaletes, chutes)	Intensificar que as inspeções dos rolos, tambores, limpadores, cavaletes e chutes, sejam feitas conforme plano de inspeção, com o objetivo de mapear os componentes críticos, criando mapa de calor, para que seja realizada a troca programada do componente antes que entrem em colapso
3	Correia (emenda, tiras, bolhas, trincas, desgaste da borda)	Sempre que houver parada preventiva da máquina, realizar análise preditiva profunda da emenda da correia utilizando dispositivo de ultrassom e todos os testes necessários para garantir a eficiência da operação da correia, emitindo diagnósticos e estipulando prazos assertivos para troca em parada programada
4	Mau contato	Realizar testes em todas as chaves de desalinhamento e garantir que todas estejam em pleno funcionamento em cada retorno de manutenção preventiva
5	Dessincronização do sistema de engrenagens do enrolador de cabos	Mecânica: analisar periodicamente o grau de criticidade do desgaste do sistema de engrenagens do enrolador de cabos. Elétrica: analisar periodicamente a frequência e demais parâmetros de operação do motor do enrolador de cabos. Ambos são responsáveis pelo diagnóstico de troca do conjunto de forma assertiva
6	Cabo frouxo	Operação: Realizar inspeção sensível do nível de grau de esticamento do cabo de alimentação da máquina; mecânica e elétrica: Realizar periodicamente a conferência do grau de esticamento para controle de torque do cabo ao longo do percurso da máquina para que seja sempre garantida a margem segura correta para operação do equipamento; elétrica: Realizar inspeção periódica do sensor de esticamento do cabo
7	Falha no inversor	Verificar a cada preventiva o estado das fiações de controle e potência, se as entradas e saídas estão ligadas com cabos blindados, nível de ruído elétrico, e cartão de controle dos inversores das máquinas
8	Falha no sistema de elevação	Realizar periodicamente medição da pressão de operação do sistema de elevação; Sempre que houver manutenção preventiva da máquina, realizar todos os testes necessários para garantir a eficiência dos dispositivos
9	Enrolador de cabos.	Realizar inspeção periódica dos parâmetros de operação dos motores do enrolador de cabos; efetuar periodicamente manutenção preventiva dos componentes do enrolador de cabos, incluindo lubrificação o controle de torque do cabo ao longo do percurso da máquina
10	Desarme do disjuntor	Verificar a frequência de desarme do disjuntor. Após, verificar as conexões estão justas e devidamente isoladas. Identificar causa do curto e realizar correção da anomalia
11	Queima do freio do motor de giro.	Instalar dispositivo de monitoramento e proteção contra queima, que emita no painel da sala de controle que há risco eminente de sobrecarga no motor do freio, que pode causar a queima

Tabela 22. Análise das causas e ações em potencial identificadas para painel elétrico (CCM, gaveta, força, comando etc.)

Nº	Causa da Falha	Ações de manutenção
12	Falha na rede Devicenet	Em cada preventiva, realizar inspeção e testes nos equipamentos de comunicação da máquina, incluindo cabos de fibra ótica e, caso necessário, efetuar substituição
13	Defeito no motor elétrico	Verificar se a ventilação do motor está adequada, medição de temperatura, tensão de trabalho, verificar isolantes térmicos, medir níveis de vibração, verificar lubrificação dos mancais

14	Falha na placa de interface do encoder do motor do enrolador de cabos	Realizar testes nos encoders da máquina, verificar se há existência de ruídos e interferências anormais, caso necessário, efetuar a troca
15	Disjuntor de freio desarmado	Verificar a frequência de desarme do disjuntor. Após, verificar as conexões estão justas e devidamente isoladas. Caso permaneça, considerar sobrecarga do equipamento
16	Desarme da bomba UH roda de caçamba	Verificar se as manutenções periódicas estão sendo executadas, coletar dados sobre o desempenho da bomba (pressão, temperatura e nível do óleo etc.) e analisar estado de funcionamento
17	Relé em falha devido aquecimento	Verificar a causa raiz do aumento da temperatura e tratar
18	Falha no Inversor	Verificar estado das fiações de controle e potência, se as entradas e saídas estão ligadas com cabos blindados, nível de ruído elétrico, e cartão de controle
19	Falha na bomba da roda de caçamba	Coletar dados sobre o desempenho da bomba (pressão, temperatura e nível do óleo etc.), verificar o nível de contaminação do óleo no reservatório da unidade hidráulica e a condição dos filtros e analisar estado de funcionamento
20	Falha no freio do giro	Verificar condições dos componentes do freio e analisar o histórico de manutenção
21	Falha no relé térmico do motor da lança	Verificar a causa raiz do aumento da temperatura e tratar
22	Falha no sistema de lubrificação	Inspeção do nível de óleo lubrificante; avaliar a presença de ruídos anormais e a pressão de saída. Padronizar o volume de lubrificante especificado no plano de manutenção preventiva. Realizar padronização do óleo lubrificante especificado no plano de manutenção preventiva. Inspeccionar a temperatura de trabalho do redutor e condições de limpeza
23	Bobina do freio queimada	Verificar os níveis de temperatura do freio e o envelhecimento do material isolante da bobina
24	Sobrecarga na bomba de elevação	Verificar os níveis de esforço aos quais a bomba está sendo submetida e comparar com os de projeto. Caso seja inferior avaliar o funcionamento dos componentes da bomba, nível de óleo, filtros etc.

Tabela 23. Ações para eliminar ou reduzir as causas de falha em potencial identificadas para correia

Nº	Causa da Falha	Ações de manutenção
25	Componentes irregulares (rolos, tambores, limpadores, cavaletes, chutes)	Garantir que as inspeções dos rolos, tambores, limpadores, cavaletes e chutes, sejam feitas conforme plano de inspeção, com o objetivo de mapear os componentes críticos para que seja realizada a troca programada antes que entrem em colapso
26	Defeito emenda	Verificar se as distâncias de transição estão de acordo com os padrões CEMA, certificando-se de seguir todas as instruções do fabricante ao unir
27	Componentes irregulares (rolos, tambores, limpadores, cavaletes, chutes)	Garantir que as inspeções dos rolos, tambores, limpadores, cavaletes e chutes, sejam feitas conforme plano de inspeção, com o objetivo de mapear os componentes críticos para que seja realizada a troca programada antes que entrem em colapso

Tabela 24. Ações para eliminar ou reduzir as causas de falha em potencial identificadas para cabo e fiação

Nº	Causa da Falha	Ações de manutenção
28	Cabo de translação frouxo	Realizar periodicamente a conferência do grau de esticamento para controle de torque do cabo ao longo do percurso da máquina para que seja sempre garantida a margem correta para operação do equipamento
29	Cabo de translação esticado	Realizar periodicamente a conferência do grau de esticamento para controle de torque do cabo ao longo do percurso da máquina para que seja sempre garantida a margem correta para operação do equipamento
30	Defeito no enrolador de cabo	Analisar o grau de criticidade do desgaste do sistema de engrenagens para tornar possível o quanto antes a troca do conjunto.
31	Rompimento da fibra de comunicação	Normatizar as manutenções feitas em cabos próximos às redes de comunicação

Tabela 25. Ações para eliminar ou reduzir as causas de falha em potencial identificadas para roda de caçamba

Nº	Causa da Falha	Ações de manutenção
32	Pino da caçamba quebrado	Operação: Realizar diariamente inspeção sensitiva nos pinos da roda de caçamba, conforme plano de inspeção operacional e relatar as anomalias encontradas para que sejam tratadas com prioridade dentro do fluxo de manutenção. Manutenção: Criar plano de inspeção detectiva em rota semanal com o objetivo de mapear todos os pinos da roda de caçamba, para que seja realizada a correção programada do componente antes que entrem em colapso
33	Defeito no rolamento	Operação: Realizar diariamente inspeção sensitiva nos rolamentos contidos na máquina, conforme plano de inspeção operacional e relatar as anomalias encontradas para que sejam tratadas com prioridade dentro do fluxo de manutenção. Manutenção: Criar plano de inspeção detectiva em rota semanal com o objetivo de mapear todos os rolamentos da máquina, para que seja realizada a correção programada do componente antes que entrem em colapso
34	Vazamento em conexões e sistema de vedação	Operação: Realizar diariamente inspeção sensitiva nas tubulações, conexões, mangueiras e vedações, conforme plano de inspeção operacional e relatar as anomalias encontradas para que sejam tratadas com prioridade dentro do fluxo de manutenção. Manutenção: Criar plano de inspeção detectiva em rota semanal com o objetivo de mapear todas as tubulações, conexões, mangueiras e vedações, para que seja realizada a correção programada do componente antes apresentem falha

Tabela 26. Ações para eliminar ou reduzir as causas de falha em potencial identificadas para unidade hidráulica

Nº	Causa da Falha	Ações de manutenção
35	Falha na unidade hidráulica roda de caçamba	Operação: Realizar diariamente inspeção sensível nas tubulações, conexões, mangueiras e vedações, conforme plano de inspeção operacional e relatar as anomalias encontradas para que sejam tratadas com prioridade dentro do fluxo de manutenção. Hidráulica: A cada manutenção preventiva verificar o nível de contaminação do óleo no reservatório da unidade hidráulica e a condição dos filtros e realizar correção caso necessário
36	Vazamento no giro	Identificar os pontos de vazamento, verificar o nível de óleo no reservatório da unidade hidráulica e completar, caso necessário, o nível de óleo suficiente.
37	Chute móvel perdendo sinal, devido ao vazamento do cilindro de elevação	Manutenção: Realizar periodicamente inspeção do nível de óleo do cilindro, das tubulações da unidade hidráulica do chute, sensoramento geral do sistema. Operação: Realizar inspeção sensível avaliando se há presença de ruídos anormais e a pressão de saída do sistema. Engenharia: Padronização do volume de lubrificante especificado no plano de manutenção preventiva. Engenharia: Realizar padronização do óleo lubrificante especificado no plano de manutenção preventiva
38	Cilindro do chute de alimentação travado	Operação: Realizar inspeção sensível avaliando se há presença de ruídos anormais e a pressão de saída do sistema. Engenharia: Padronização do volume de lubrificante especificado no plano de manutenção preventiva. Engenharia: Realizar padronização do óleo lubrificante especificado no plano de manutenção preventiva
39	Falha na bomba do redutor da roda de caçambas	Coletar dados sobre o desempenho da bomba (pressão, temperatura e nível do óleo etc.), verificar o nível de contaminação do óleo no reservatório da unidade hidráulica e a condição dos filtros e analisar estado de funcionamento.
40	Perda de pressão no sistema hidráulico da roda de caçambas	Identificar os pontos de vazamento, verificar o nível de óleo no reservatório da unidade hidráulica e completar, caso necessário, o nível de óleo suficiente
41	Sobrecarga na bomba hidráulica	Verificar os níveis de esforço aos quais a bomba está sendo submetida e comparar com os de projeto. Caso seja inferior avaliar o funcionamento dos componentes da bomba, nível de óleo, filtros etc.

Tabela 27. Ações para eliminar ou reduzir as causas de falha em potencial identificadas para transportador de correia

Nº	Causa da Falha	Ações de manutenção
42	Defeito emenda	Sempre que houver parada preventiva da máquina, realizar análise preditiva profunda da emenda da correia utilizando dispositivo de ultrassom e todos os testes necessários para garantir a eficiência da operação da correia, emitindo diagnósticos e estipulando prazos assertivos para troca em parada programada
43	Componentes irregulares (rolos, tambores, limpadores, cavaletes, chutes)	Intensificar que as inspeções dos rolos, tambores, limpadores, cavaletes e chutes, sejam feitas conforme plano de inspeção, com o objetivo de mapear os componentes críticos, criando mapa de calor, para que seja realizada a troca programada do componente antes que entrem em colapso
44	Fabricação, topografia, fim de vida útil	Operação: Realizar diariamente inspeção sensível nos rolos, tambores, limpadores, cavaletes e chutes, conforme plano de inspeção operacional e relatar as anomalias encontradas para que sejam tratadas com prioridade dentro do fluxo de manutenção. Manutenção: Criar plano de inspeção detectiva em rota semanal com o objetivo de mapear os componentes críticos, criando mapa de calor e curva de tendência de falha, para que seja realizada a troca programada do componente antes que entrem em colapso
45	Fabricação, topografia, fim de vida útil	Operação: Realizar diariamente inspeção sensível nos rolos, tambores, limpadores, cavaletes e chutes, conforme plano de inspeção operacional e relatar as anomalias encontradas para que sejam tratadas com prioridade dentro do fluxo de manutenção. Manutenção: Criar plano de inspeção detectiva em rota semanal com o objetivo de mapear os componentes críticos, criando mapa de calor e curva de tendência de falha, para que seja realizada a troca programada do componente antes que entrem em colapso
46	Defeito emenda	Verificar se as distâncias de transição estão de acordo com os padrões CEMA, certificando-se de seguir todas as instruções do fabricante ao unir.
47	Componentes irregulares (rolos, tambores, limpadores, cavaletes, chutes)	Garantir que as inspeções dos rolos, tambores, limpadores, cavaletes e chutes, sejam feitas conforme plano de inspeção, com o objetivo de mapear os componentes críticos para que seja realizada a troca programada antes que entrem em colapso

Fonte: Autores (2025).

CONTROLE DO FMEA

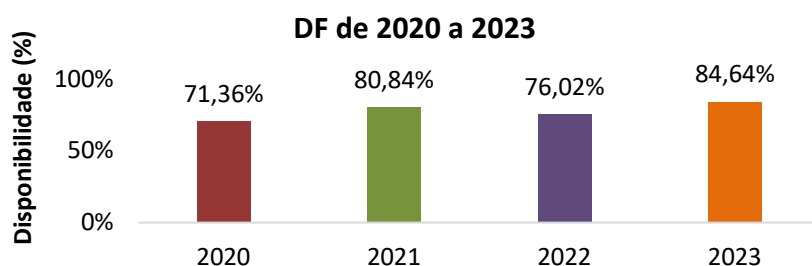
Os resultados dos indicadores de manutenção quantificados entre 2020 e 2023, isto é, horas de calendário (HC), as horas de manutenção totais (HM), as horas de manutenção preventiva (HMP), as horas de manutenção corretiva (HMC) e a disponibilidade física (DF) (Tabela 28).

Tabela 28. Indicadores de manutenção medidos entre 2020 e 2023

Indicador	Ano			
	2020	2021	2022	2023
HMC (h)	570,7	534,4	546,7	325,5
HMP (h)	1945,3	1144,1	1554,0	1020,0
HM (h)	2516,0	1678,4	2100,6	1345,5
HC (h)	8784,0	8760,0	8760,0	8760,0
DF (%)	71,36%	80,84%	76,02%	84,64%

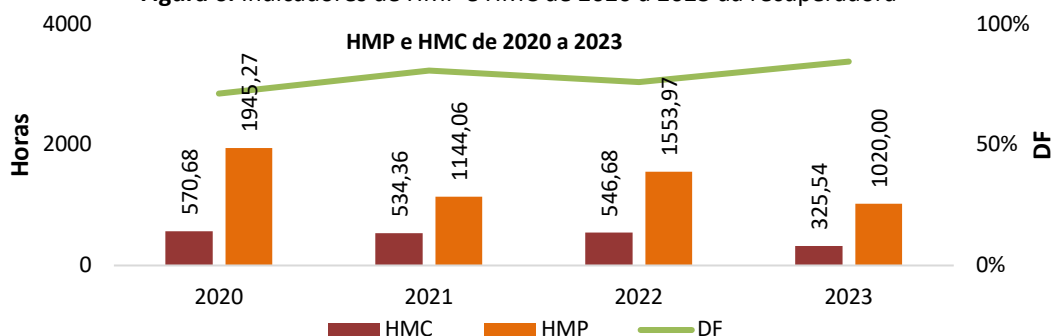
Fonte: Autores (2025).

A Figura 5, por sua vez, exibe o histórico de disponibilidade física graficamente. Em suma, percebe-se uma tendência de aumento da disponibilidade física ao longo dos anos devido uma redução nas horas de manutenção corretiva e preventiva, associada às medidas propostas e implementadas via FMEA.

Figura 5. Histórico de disponibilidade física da recuperadora

Fonte: Autores (2025).

Para melhor entendimento, apresenta-se um comparativo da apuração do HMP e HMC de 2020 a 2023, com destaque para as reduções mais significativas em 2023, onde foram alcançados os menores números de HMC (325,536 horas) e HMP (1.020,00 horas) e, consequentemente, o maior resultado de DF dos 4 anos avaliados (84,64%) (Figura 6).

Figura 6. Indicadores de HMP e HMC de 2020 a 2023 da recuperadora

Fonte: Autores (2025).

Vale lembrar que o FMEA foi realizado no ano de 2021. Portanto, as ações propostas passaram a ser executadas ao longo dos anos seguintes. Dentre elas, destaca-se uma grande parada preventiva que ocorreu no ano de 2022 para a atuação em ações relevantes traçadas neste estudo. Essa parada foi a grande responsável por elevar o número de HMP em 2022, representando aproximadamente 410h de horas de manutenção preventiva a mais do que o ano anterior.

CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo geral aumentar a disponibilidade física de uma máquina recuperadora de minério de ferro por meio da aplicação da ferramenta FMEA. Além disso, os seguintes objetivos específicos (OE) foram definidos: identificar os subsistemas mais críticos da recuperadora em termos do quantitativo de hora de manutenção corretiva (OE1); medir diferentes indicadores de manutenção, visando o acompanhamento histórico após a implementação do FMEA (OE2).

Para satisfazer o OE1, uma priorização dos subsistemas da máquina foi implementada por meio de um Diagrama de Pareto, considerando o número de horas em manutenção corretiva. Essa análise foi baseada em apontamentos de falhas e registros de manutenção, os quais permitiram identificar os subsistemas mais críticos. Nesse caso, a falta de padronização nos registros foi a principal dificuldade encontrada, o que exigiu um esforço adicional para a normalização dos dados. Como aprendizado, destaca-se a importância de um sistema de registro de manutenção bem estruturado. Em termos do OE2, pode-se afirmar que os indicadores mostraram uma melhoria significativa, inclusive, para a própria disponibilidade física do ativo, confirmando a eficácia das ações implementadas e satisfazendo o objetivo geral proposto.

Em síntese, o trabalho demonstrou que a aplicação da metodologia FMEA é eficaz para aumentar a disponibilidade física de máquinas recuperadoras de minério de ferro. Os objetivos específicos foram alcançados, e os resultados obtidos reforçam a importância de uma abordagem sistemática e colaborativa na gestão da manutenção. Este estudo contribuiu para a melhoria contínua do ativo em questão, reforçando o potencial do FMEA.

Para trabalhos futuros, recomenda-se incluir no FMEA os subsistemas de Inversor/Conversor/Soft starter e lubrificação centralizada - roda de caçamba, alcançando os subsistemas que oneram em 90% das horas de manutenção corretiva; acompanhar os resultados também em termos de indicadores financeiros, como o custo de manutenção por faturamento da planta ou ganho de produção proveniente de horas trabalhadas que antes eram horas de manutenção corretiva; e aplicar a metodologia FMEA em outras máquinas e equipamentos da planta.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT. (1994). NBR 5462: confiabilidade e manutenibilidade. ABNT.

Agência Nacional de Mineração. (2021). Sistema Arrecadação: arrecadação CFEM Ano: 2020. ANM. https://sistemas.anm.gov.br/arrecadacao/extra/Relatorios/arrecadacao_cfem_ano.aspx?ano=2020

Aguiar, S. (2002). Integração das ferramentas da qualidade ao PDCA e ao programa Seis Sigma. Editora de Desenvolvimento Gerencial.

Ben-Daya, M., Duffuaa, S. O., Raouf, A., Knezevic, J., & Ait-Kadi, D. (Eds.). (2009). Handbook of maintenance management and engineering: Springer.

ECO4U. (2013). Brasil: um dos países com maior potencial em recursos minerais do planeta, com 55 tipos de minerais explorados. <https://eco4u.wordpress.com/2013/01/28/brasil-um-dos-paises-com-maior-potencial-em-recursos-minerais-do-planeta-com-55-tipos-de-minerais-explorados/>

Fernandes, J. M. R. (2005). Proposição de abordagem integrada de métodos da qualidade baseada no FMEA [Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Paraná]. Repositório da PUC-PR.

Fogliatto, F. S. & Ribeiro, J. L. D. (2011). Confiabilidade e manutenção industrial. Elsevier; ABEPRO.

Instituto Brasileiro de Mineração. IBRAM. (2024). Mineral market data - mercado mundial de minério de ferro. Brasília. Recuperado de https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2024/09/Mineracao_para_jornalista.pdf

Juran, J. M. (2018). Juran's quality handbook. 6. ed. New York: McGraw-Hill.

Menčík, P. (2016). Failure Mode and Effect Analysis – FMEA. In: *IntechOpen*. Recuperado de <https://www.intechopen.com/chapters/50081>

Mendes, J. J., Araújo, L. A. C., & Silva, R. R. (2014). Engenharia de confiabilidade. Um estudo de caso para avaliação do desempenho do sistema de descarga de minério “virador de vagões” durante o primeiro ano de operação. In: *Anais do 34º Encontro Nacional de Engenharia de Produção* (pp. 1-17). ENEGE. <https://www.abepro.org.br/publicacoes/>

Rodrigues, D. & Lengyel, P. (2023). Exploring the correlation between brazilian iron ore exports and the Chinese construction sector. Recuperado de <https://journal.magisz.org/index.php/jai/article/view/689>

Santos, A. C. O. (2009). Análise do indicador global de equipamentos para elevação de restrições físicas em um ambiente de manufatura enxuta [Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Itajubá]. Instituto de Engenharia de Produção e Gestão.

Siqueira, M. C. (2005). Gestão estratégica da informação: como transformar o conteúdo informacional em conhecimento valioso. Brasport.

Stamatis, D. H. (2003). Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution. 2. ed. Milwaukee: ASQ Quality Press.

Vale S. A. (2021, janeiro 7). Qual a importância da mineração para a economia do país? <http://www.vale.com/brasil/pt/ab-outvare/news/paginas/qual-a-importancia-da-mineracao-para-a-economia-do-pais.aspx>

Viana, H. R. G. (2002). PCM, planejamento e controle de manutenção. Qualitymark.