



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



Leniewerson Silva França

**Estruturação da gestão da confiabilidade de analisadores *on-line* no
beneficiamento de minério de ferro**

OURO PRETO - MG
2026

Leniewerson Silva França

**Estruturação da gestão da confiabilidade de analisadores *on-line* no
beneficiamento de minério de ferro**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau em Bacharel em Engenharia de Produção.
Orientadora: Profa. Dra. Maurinice Daniela Rodrigues.

OURO PRETO – MG
2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

F814e Franca, Leniewerson Silva.
Estruturação da gestão da confiabilidade de analisadores on-line no beneficiamento de minério de ferro. [manuscrito] / Leniewerson Silva Franca. - 2026.
73 f.

Orientadora: Profa. Dra. Maurinice Daniela Rodrigues.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Produção .

1. Gestão da qualidade total. 2. Beneficiamento de minério. 3. Confiabilidade (Engenharia). 4. Análise de Modo e Efeito de Falha (FMEA).
I. Rodrigues, Maurinice Daniela. II. Universidade Federal de Ouro Preto.
III. Título.

CDU 658.5

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO,
ADMINISTRAÇÃO E ECON



FOLHA DE APROVAÇÃO

Leniewerson Silva França

Estruturação da gestão da confiabilidade de analisadores *on-line* no beneficiamento de minério de ferro

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 04 de março de 2026

Membros da banca

Profa. Dra. Maurinice Daniela Rodrigues - Orientador(a) (Universidade Federal de Ouro Preto)
Prof. Dr. Raoni de Oliveira Inácio - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Prof. Me. Cristiano Luís Turbino de França e Silva - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Profa. Dra. Maurinice Daniela Rodrigues, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 31/03/2026



Documento assinado eletronicamente por **Maurinice Daniela Rodrigues, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 31/03/2026, às 11:06, 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 **1082860** e o código CRC **8F39609D**.

À minha família pelo amor, apoio e confiança.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida, pela saúde e pela força concedida ao longo desta trajetória acadêmica.

À minha esposa, Thais, e à minha filha, Laura, pelo apoio incondicional, pela compreensão nos momentos de ausência e pelo incentivo constante para que esta etapa fosse concluída. À minha mãe, Cleonice, pelo exemplo, pelos ensinamentos e pelo estímulo permanente à busca pelo conhecimento.

À minha orientadora, pela paciência, disponibilidade e valiosas contribuições ao longo do desenvolvimento deste trabalho, fundamentais para a sua conclusão. Estendo meus agradecimentos aos demais professores do curso, cujos ensinamentos foram essenciais para minha formação acadêmica e profissional.

Por fim, aos amigos, pelo apoio e incentivo ao longo desta caminhada.

RESUMO

Os analisadores *on-line* são fundamentais para assegurar estabilidade operacional, redução de variabilidade e suporte consistente aos sistemas de automação e controle de processo de beneficiamento de minério de ferro. Este trabalho objetiva analisar os modos e efeitos de falha (*Failure Mode and Effects Analysis* - FMEA) dos analisadores *on-line* Courier 6i e PSI300, propondo um plano de manutenção que propicie o aumento de confiabilidade desses equipamentos. A lógica da pesquisa-ação foi considerada como referência conceitual e operacionalizada em quatro fases principais, sendo elas diagnóstico, análise, plano de ação e avaliação. A partir da hierarquização dos modos de falha foram definidas estratégias de manutenção preventiva e corretiva, implantação de monitoramento automatizado por variáveis de *status* integradas aos sistemas corporativos, estruturação de planos de manutenção no sistema SAP, capacitação das equipes operacionais e internalização do processo de calibração por meio do *software* Outocal. Os resultados preliminares indicaram fortalecimento da governança técnica dos ativos, maior rastreabilidade da indisponibilidade operacional, redução de falhas recorrentes de baixa complexidade e aumento da autonomia técnica das equipes. O estudo contribui para a consolidação de práticas estruturadas de gestão da confiabilidade aplicadas a sistemas de análise *on-line* no contexto do beneficiamento mineral.

Palavras-chave: Manutenção Centrada na Confiabilidade; Análise de Modo e Efeito de Falha; FMEA; Analisadores *on-line*; Beneficiamento mineral; Gestão da confiabilidade.

ABSTRACT

On-line analyzers play a crucial role in ensuring operational stability, minimizing variability, and consistently supporting automation and process control systems in iron ore beneficiation. The objective of this study is to conduct a Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) of the Courier 6i and PSI300 on-line analyzers, with the aim of proposing a maintenance plan to enhance equipment reliability. Action-research was adopted as the conceptual framework and structured into four main phases: diagnosis, analysis, action plan, and evaluation. Based on the prioritization of failure modes, preventive and corrective maintenance strategies were established, automated monitoring through status variables integrated into corporate systems was implemented, maintenance plans were organized within the SAP system, operational teams were trained, and the calibration process was implemented in-house using the Outocal software. Preliminary results demonstrated strengthened technical governance of assets, improved traceability of operational downtime, reduction of recurring low-complexity failures, and increased technical autonomy of the teams. This study contributes to the consolidation of structured reliability engineering practices applied to on-line analysis systems in the context of mineral processing.

Keywords: Reliability-Centered Maintenance; Failure Mode and Effects Analysis; FMEA; On-line Analyzers; Mineral Processing; Reliability Management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura da FMEA	24
Figura 2 - Fluxograma típico de beneficiamento de minério de ferro	31
Figura 3 – Sistema de análise para polpa de minério de ferro.....	33
Figura 4 - Esquema de medição XRF.....	34
Figura 5 - Esquema de medição do PSI300.....	35
Figura 6 - Variável de <i>status</i> do analisador courier.....	42
Figura 7 - Variável de <i>status</i> inserida no sistema PIMs	43
Figura 8 – Apuração da disponibilidade automatizado no sistema MES	43
Figura 9 – Plano de manutenção preventiva dos analisadores no sistema SAP	57
Figura 10 – Modelo de calibração com baixa correlação	63
Figura 11 – Modelo de calibração com alta correlação.....	64
Figura 12 – Gráfico da disponibilidade apurada mês a mês no ano de 2025	66

LISTA DE TABELAS

Quadro 1 – Perguntas fundamentais da Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC).....	16
Quadro 2 – Aplicações de MCC e FMEA na mineração	17
Quadro 3 – Sugestão de escala para avaliação dos efeitos dos modos de falha.....	21
Quadro 4 – Sugestão de escala para avaliação da ocorrência da causa de falha.....	22
Quadro 5 – Sugestão de escala para avaliação da detecção.....	23
Quadro 6 – Classificação da FMEA conforme o objeto de análise.....	25
Quadro 7– Etapas da pesquisa-ação aplicada ao estudo dos analisadores	27
Quadro 8 – Objetivos específicos da pesquisa	37
Quadro 9 – Síntese dos diagnósticos obtidos nas entrevistas.....	38
Quadro 10 – Amostra do banco de dados consolidado a partir dos registros operacionais	41
Quadro 11 – Critérios para avaliação da severidade (S)	45
Quadro 12 – Critérios para avaliação da ocorrência (O)	46
Quadro 13 – Critérios para avaliação da detecção (D).....	47
Quadro 14 –FMEA analisador <i>on-line</i> Metso PSI300.....	48
Quadro 15 – FMEA do analisador Metso Courier 6i	51
Quadro 16 – Ações prévias para estabelecimento e execução do plano manutenção dos analisadores	54
Quadro 17 – Potencial redução do NPR da FMEA do PSI300	59
Quadro 18 - Potencial redução do NPR da FMEA do Courier 6i	60

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Manutenção Centrada em Confiabilidade	15
2.1.1	Fundamentos da MCC	15
2.1.2	Aplicações da MCC na mineração	16
2.1.3	Estratégias de MCC	18
2.2	Análise de Modos e Efeitos de Falha	20
3	METODOLOGIA.....	26
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
4.1	Diagnóstico	29
4.1.1	Entendimento do contexto e propósito	29
4.1.2	Definição da equipe, objetivos e expectativas.....	35
4.1.3	Levantamento exploratório por entrevistas	37
4.1.4	Diagnóstico técnico da condição dos analisadores.....	39
4.1.5	Levantamento e organização de registros operacionais.....	40
4.2	Análise	44
4.2.1	Desenvolvimento da FMEA	44
4.3	Plano de Ação	53
4.3.1	Ações prévias para estabelecimento e execução do plano manutenção dos analisadores.....	53
4.3.2	Definição da estratégia de manutenção	56
4.4	Avaliação	58
4.4.1	Resultados do desenvolvimento do plano de manutenção	58
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	68
	REFERÊNCIAS	70

1 INTRODUÇÃO

Os equipamentos de análise em tempo real (análise *on-line*) podem compor parte do sistema de medição do processo de beneficiamento de minério de ferro. Esses equipamentos ocupam posição estratégica no monitoramento dos parâmetros de qualidade, como composição e granulometria das linhas de alimentação, concentrado e rejeitos (arenoso e lama). Dessa forma, viabilizam intervenções operacionais rápidas, possibilitando a redução da variabilidade do processo e conseqüentemente minimizando suas perdas e melhorando a recuperação. Para aumentar a exatidão desses equipamentos, que funcionam como um “laboratório *on-line*” da planta, entregando análises rápidas que aumentam a confiabilidade operacional e melhoram a tomada de decisão em tempo real, a Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) mostra-se particularmente importante.

Os equipamentos Courier 6i e PSI300 são soluções da Metso para análise em tempo real em operações de mineração e beneficiamento, integrados em seus sistemas de automação e otimização de processo. O Courier 6i é utilizado para análises químicas rápidas e contínuas de minério para identificar concentrações de elementos químicos, como ferro, sílica, alumina, manganês, enxofre, entre outros. Este analisador apresenta boa precisão e rapidez, sem necessidade de reagentes e com mínima intervenção humana. Já o PSI300 atua como um equipamento dedicado a medir de forma contínua e em tempo real a distribuição granulométrica das correntes de processo, especialmente em circuitos de moagem e classificação. Enquanto o Courier 6i faz análises químicas em tempo real, o PSI 300 fecha o ciclo ao entregar o controle granulométrico, que é um dos parâmetros mais sensíveis e importantes para a eficiência global do circuito de cominuição.

Quando um analisador *on-line* apresenta falhas ou medições com baixa exatidão, há impacto direto na tomada de decisão operacional e, conseqüentemente, no desempenho do processo produtivo. Ajustes incorretos na moagem, na classificação ou na dosagem de reagentes podem ser realizados com base em informações inadequadas, resultando em aumento da geração de rejeitos e elevação do consumo energético. Em contrapartida, analisadores *on-line* confiáveis fornecem informações contínuas, precisas e representativas do estado real do processo, ampliando a clareza e a compreensão do comportamento operacional da planta, e assegurando suporte consistente aos sistemas de automação e controle.

Por exemplo, a confiabilidade operacional do Metso Courier 6 é essencial para que o processo de beneficiamento responda adequadamente às variações de minério. Já para o analisador de tamanho de partículas Metso PSI300, a confiabilidade operacional garante o controle eficiente da moagem e da classificação, permitindo ajustes imediatos no circuito de beneficiamento.

Esses equipamentos fazem parte da planta de beneficiamento de minério de ferro de uma empresa do setor de mineração localizada no estado de Minas Gerais. Medições imprecisas ou a indisponibilidade dos analisadores comprometem a capacidade de monitoramento contínuo do processo, tornando a planta excessivamente dependente das análises laboratoriais compostas, realizadas em frequência bi-horária. A confiabilidade dos sistemas de análise *on-line* deve ser tratada como um elemento crítico da cadeia produtiva do beneficiamento mineral, uma vez que sustenta as tomadas de decisão nos controles de processo.

Este trabalho objetiva analisar os modos e efeitos de falha dos analisadores *on-line* Courier 6i e PSI300, propondo um plano de manutenção que propicie o aumento de confiabilidade desses equipamentos. No contexto dos analisadores *on-line*, a confiabilidade está associada à probabilidade desses equipamentos desempenharem corretamente sua função principal — fornecer medições contínuas, exatas e disponíveis ao processo — ao longo de um período determinado e sob as condições operacionais e ambientais típicas da planta de beneficiamento mineral (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011).

Aplicar a MCC aos analisadores Courier 6i e PSI300 significa identificar funções críticas, modos potenciais de falha e consequências associadas, direcionando ações preventivas e preditivas que minimizem paradas não programadas e preservem a qualidade das medições. A MCC permite que o foco da manutenção deixe de ser apenas a correção de falhas e passe a ser a preservação da função, priorizando intervenções que tragam maior impacto à confiabilidade global do sistema. Para tanto, uma das principais e clássicas ferramentas da MCC que podem ser utilizadas é a Análise de Modos de Falha e Efeitos (*Failure Modes and Effects Analysis* - FMEA). A FMEA é útil para entender quais componentes causam variações químicas ou granulométricas indesejadas, quais modos de falha podem comprometer o controle do processo e quais tarefas de manutenção realmente fazem sentido para evitar perda de desempenho, disponibilidade ou confiabilidade.

Na análise de riscos da MCC, a FMEA permite transformar conhecimento técnico, histórico de falhas, comportamento operacional e requisitos funcionais em decisões objetivas sobre que tipo de manutenção aplicar, como manutenção preventiva, condicionada, preditiva, redesenho (*redesign*) ou até mesmo decisão de não intervir quando o risco é baixo. Assim, a aplicação dessa ferramenta neste estudo visa garantir a preservação das funções essenciais dos analisadores *on-line*, assegurando alta disponibilidade e exatidão metrológica dos sistemas de medição que sustentam o processo de beneficiamento do minério de ferro.

Em 2025 os analisadores do concentrador 2, que também estavam parados, foram colocados em operação, e os do concentrador 3 encontravam-se em operação, mas sem controle de manutenção e, portanto, os dados não estavam sendo usados pelo processo. A planta de beneficiamento de minério buscava a integração do Courier 6i e PSI300 com sistemas especialistas para melhoria dos parâmetros de processo, aumento da confiabilidade, diminuição dos tempos de resposta e minimização da variabilidade do processo. Os sistemas especialistas atuam continuamente interpretando os dados produzidos pelos analisadores, cruzando-os com o conhecimento operacional previamente estruturado e tomando decisões automáticas ou semiautomáticas relacionadas ao diagnóstico de falhas, ajustes de processo e recomendações de manutenção. Esses sistemas permitem a tomada de decisão baseada em dados, algo valioso na MCC e auditorias técnicas.

O trabalho proposto justifica-se pela necessidade de aumentar a disponibilidade dos analisadores, contribuindo para a otimização do processo, redução de perdas e maior competitividade da planta. A confiabilidade dos analisadores *on-line* Courier 6i e PSI300 é fundamental para o controle eficiente do beneficiamento de minério de ferro, garantindo precisão nas medições e estabilidade operacional. Falhas nesses equipamentos podem comprometer a tomada de decisão, aumentar custos e reduzir a eficiência do processo. Há também a possibilidade de gerar conhecimento a partir de modelos que podem ser replicados por outras plantas, apoiando padronização, priorização de manutenção e estratégias de mitigação de risco em equipamentos de análise *on-line*.

O Courier 6i e o PSI300 são equipamentos especializados e, em muitos casos, grande parte do conhecimento técnico necessário para diagnóstico e manutenção permanece concentrada em manuais do fabricante e em sua equipe de suporte técnico, não havendo a disseminação do conhecimento necessário para manutenção e conservação

destes ativos. REMES *et al.* (2007) demonstram que a velocidade e a exatidão da análise elementar *on-line* influenciam significativamente o desempenho do controle de flotação, sendo possível observar perdas de valor econômico quando o tempo de ciclo de análise aumenta, reforçando que esses analisadores podem ser compreendidos como “sensores avançados” do processo, cuja confiabilidade sustenta decisões de operação e otimização em tempo quase real. Ao combinar conceitos de engenharia de confiabilidade com a dinâmica do processo mineral, este trabalho aproxima a literatura acadêmica da realidade operacional, propondo um arcabouço estruturado para maximizar a disponibilidade e exatidão analítica, reduzindo riscos de decisões equivocadas e ampliando os ganhos associados ao uso confiável da instrumentação *on-line*.

Para atingir o objetivo deste trabalho, adota-se a abordagem de pesquisa-ação, na qual o pesquisador integra-se ao contexto operacional, participando do diagnóstico técnico, da análise estruturada das falhas e da proposição das estratégias de manutenção e sua avaliação.

Além desta introdução, o trabalho está estruturado da seguinte forma: o capítulo 2 apresenta o referencial teórico, abordando os fundamentos da MCC, as principais estratégias de manutenção aplicáveis ao contexto industrial e a metodologia FMEA; o capítulo 3 descreve o método de pesquisa adotado, detalhando a aplicação da pesquisa-ação no contexto industrial analisado; o capítulo 4 apresenta os resultados da pesquisa, contemplando o diagnóstico inicial dos analisadores *on-line* Courier 6i e PSI300, a definição dos limites de análise, a preparação e transformação dos dados e a elaboração das FMEAs. A partir dessas etapas, é estruturado um plano de ação orientado pelos princípios da MCC, com foco na melhoria da gestão da confiabilidade e da exatidão metrológica dos equipamentos bem como a avaliação das ações desenvolvidas; por fim, o capítulo 5 reúne as considerações finais, destacando as principais contribuições técnicas e metodológicas do estudo, suas limitações e as recomendações para trabalhos futuros relacionados à gestão da confiabilidade de sistemas de análise *on-line* no beneficiamento mineral.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Manutenção Centrada em Confiabilidade

2.1.1 Fundamentos da MCC

A MCC consiste em um programa sistematizado de técnicas de engenharia com o objetivo de garantir que os equipamentos desempenhem suas funções com máxima eficiência (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011). A aplicação dos conceitos do MCC visa garantir uma operação com baixo nível de indisponibilidade e uma elevada exatidão dos sistemas de medição. Diferentemente das abordagens tradicionais, a MCC desloca o foco da manutenção da simples correção de falhas para a preservação das funções dos ativos ao longo de seu ciclo de vida, considerando os impactos das falhas sobre a segurança, a operação, o meio ambiente, a disponibilidade operacional e os custos ao longo do ciclo de vida dos equipamentos (MOUBRAY, 2000; SMITH; HINCHCLIFFE, 2003; FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011).

De acordo com Moubray (2000), os ativos devem ser gerenciados com base em suas funções e nos padrões de desempenho exigidos, reconhecendo-se que, ao longo do tempo, esses requisitos podem sofrer alterações em função de mudanças operacionais, tecnológicas ou organizacionais. Essa visão funcional constitui o alicerce conceitual da MCC e orienta a análise sistemática do comportamento dos equipamentos frente às falhas.

As questões centrais que fundamentam a lógica da MCC, possibilitam a análise estruturada das funções dos ativos, dos modos potenciais de falha, de suas causas e efeitos, bem como a definição das estratégias de manutenção mais apropriadas para a mitigação dos impactos operacionais, econômicos e de confiabilidade.

Smith e Hinchcliffe (2003), assim como Moubray (2000) destacam que a MCC se estrutura a partir de um conjunto de questões fundamentais que orientam a análise sistemática das funções dos ativos, dos modos pelos quais essas funções podem falhar e das consequências dessas falhas para a operação. O Quadro 1 sistematiza essas questões fundamentais.

Quadro 1 – Perguntas fundamentais da Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC)

Nº PERGUNTAS FUNDAMENTAIS DA MCC

1	Quais são as funções do ativo e quais os padrões de desempenho esperados no seu contexto atual de operação?
2	De que forma o ativo pode falhar ao cumprir suas funções (falhas funcionais)?
3	Quais são as causas de cada falha funcional identificada?
4	O que acontece quando cada falha ocorre (efeitos da falha)?
5	De que forma cada falha impacta a segurança, o meio ambiente, a operação ou os custos (consequências da falha)?
6	O que pode ser feito para prever, prevenir ou mitigar cada falha (tarefas proativas)?
7	O que deve ser feito quando não existe uma tarefa proativa tecnicamente viável ou economicamente justificável?

Fonte: Adaptado de Moubray (2000).

Fogliatto e Ribeiro (2011) complementam que a efetividade da MCC depende da utilização de ferramentas analíticas capazes de organizar essas questões de forma estruturada, permitindo identificar, priorizar e tratar os riscos associados aos modos de falha. Essa estruturação pode ser realizada por meio da FMEA, de modo a operacionalizar os princípios da MCC.

2.1.2 Aplicações da MCC na mineração

A aplicação da MCC no setor de mineração tem sido reportada em diferentes tipos de ativos e contextos operacionais, frequentemente associada ao uso de ferramentas como FMEA e análise de criticidade. O Quadro 2 apresenta trabalhos que relatam aplicações práticas da MCC em equipamentos e sistemas de mineração, bem como seus principais resultados.

Quadro 2 – Aplicações de MCC e FMEA na mineração

<i>AUTOR</i>	<i>ÁREA DE APLICAÇÃO</i>	<i>PRINCIPAIS RESULTADOS</i>
Gonçalves (2024)	Equipamentos móveis e correias – mineração	Aplicação estruturada da MCC com análise de falhas (Pareto e <i>Mean Time To Repair</i> - MTTR), identificação de ativos crítico-crônicos e priorização de ações para redução de paradas não planejadas.
Ferreira (2021)	Processamento mineral	Redução de falhas e horas paradas, melhoria na priorização da manutenção e aumento da confiabilidade operacional.
Palei <i>et al.</i> , 2020	Mineração de carvão a céu aberto	Otimização da substituição de 26 componentes críticos, redução de 231 h/ano de indisponibilidade e ganho econômico superior a US\$ 495 mil.
Zanetti (2019)	Equipamentos de perfuração	Aplicação de FMEA e MCC com priorização por NPR, redefinição de políticas de manutenção e aumento da confiabilidade do sistema crítico.
Silva (2018)	Pás-carregadeiras	MCC + FMEA + Weibull para hierarquização de sistemas críticos, definição de planos preventivos e redução de custos com falhas recorrentes.
Morad <i>et al.</i> , 2014	Mineração de cobre a céu aberto	Aplicação de MCC para identificação de componentes críticos, aumento da disponibilidade mecânica e redução de custos operacionais.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

2.1.3 Estratégias de MCC

Abaixo são descritas estratégias de manutenção que podem ser utilizadas com o objetivo de manter a função de equipamentos;

- Manutenção Corretiva

A manutenção corretiva, como exposto por Fogliatto e Ribeiro (2011), ocorre quando o item já falhou, compreendendo todas as ações necessárias para restabelecer as funções requeridas dos equipamentos ao estado perdido. Smith e Hinchcliffe (2003), defendem a manutenção corretiva alinhada à filosofia do MCC, sendo válida sempre que as consequências da falha sejam aceitáveis, não oferecendo riscos às pessoas, ao meio ambiente e à reputação da empresa.

Bloom (2005) reforça a manutenção corretiva como um princípio do MCC, na qual devem ser adotadas para itens não críticos, norteadas por indicadores de maneira estratégica. Moubray (2000) complementa que rodar até a falha deve ser adotado quando for a opção mais econômica, uma vez que a consequência destas falhas não são significativas, não ofereça risco ou quando a preventiva não seja eficiente, podendo provocar a falha prematura do item.

- Manutenção Preventiva

A manutenção preventiva, segundo Moubray (2000), é válida, desde que, apresentem a capacidade de prevenção da falha ou a capacidade de reduzir a consequência da falha, sendo economicamente justificável. A manutenção preventiva é executada em intervalos predeterminados com o intuito de reduzir a probabilidade de falha ou a degradação funcional do ativo (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011).

Smith e Hinchcliffe (2003) e Bloom (2005) argumentam que a manutenção preventiva não é necessariamente a melhor opção, devendo ser avaliada caso a caso e que sua adoção deve ser aplicada, mediante evidência da redução da probabilidade de falhas funcionais, garantindo que o aumento dos custos de manutenção agregue valor à confiabilidade do ativo.

- Manutenção Preditiva

A manutenção preditiva constitui uma estratégia de manutenção baseada no monitoramento sistemático da condição do ativo, por meio de medições, ensaios e

controle estatístico de variáveis operacionais, com o objetivo de antecipar a ocorrência de falhas e determinar o momento tecnicamente adequado para intervenção (VIANA, 2002).

Diferentemente da manutenção preventiva sistemática, executada em intervalos fixos, a manutenção preditiva busca utilizar o componente até o máximo de sua vida útil funcional, evitando desmontagens desnecessárias e intervenções prematuras. Seu princípio fundamental consiste na identificação de sinais de degradação progressiva que precedem a falha funcional, permitindo programação planejada da ação corretiva.

Segundo Viana (2002), a manutenção preditiva apoia-se em técnicas de monitoramento que possibilitam acompanhar o comportamento do equipamento ao longo do tempo. Entre as principais técnicas aplicadas na indústria destacam-se: ensaio por ultrassom; análise de vibrações mecânicas; termografia; análise de óleo lubrificante.

- Reprojeto (*Redesign*)

O reprojeto, no contexto da MCC, refere-se a qualquer modificação realizada na especificação de um equipamento, componente, processo ou procedimento, com o objetivo de eliminar ou reduzir a probabilidade e/ou as consequências de um modo de falha identificado (MOUBRAY, 2000). O termo é utilizado em sentido amplo, abrangendo desde a substituição de componentes por versões mais robustas até alterações no processo operacional ou na arquitetura do sistema.

Segundo Moubray (2000), o reprojeto aparece como alternativa decisória ao final da lógica estruturada da MCC, sendo considerado ação obrigatória quando as falhas apresentam consequências inaceitáveis relacionadas à segurança ou ao meio ambiente e não existe tarefa preventiva ou preditiva capaz de reduzir o risco a um nível tolerável. Nesses casos, a única solução aceitável é modificar o projeto do sistema ou eliminar a condição perigosa.

2.2 Análise de Modos e Efeitos de Falha

A FMEA é uma ferramenta estruturada e sistemática destinada à identificação dos modos de falha, as causas e seus efeitos sobre o desempenho do ativo (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011). Segundo os mesmos autores, a aplicação do FMEA permite avaliar a criticidade das falhas por meio da classificação quanto à severidade dos efeitos, à frequência de ocorrência e à capacidade de detecção, constituindo-se em um importante instrumento de suporte à MCC.

A FMEA examina de maneira detalhada as fragilidades do sistema, promovendo uma compreensão aprofundada das relações entre modos de falha, suas causas e seus impactos operacionais (Smith e Hinchcliffe, 2003). Essa abordagem estruturada contribui diretamente para a definição de estratégias de manutenção mais eficazes e alinhadas aos riscos reais do processo.

Sob a ótica da MCC, Moubray (2000) reconhece o valor do FMEA como uma ferramenta analítica relevante, porém ressalta que ele não representa, isoladamente, o processo completo da MCC. Segundo o autor, a FMEA deve ser compreendida como um componente fundamental de apoio à tomada de decisão, cuja eficácia plena depende de sua integração ao processo decisório mais amplo da MCC.

Bloom (2005) enfatiza a importância de análises estruturadas de falhas como etapa inicial do processo da MCC, destacando a necessidade de compreender de forma sistemática as causas, os mecanismos e as consequências das falhas. Embora o autor utilize predominantemente o conceito de *Cause-and-Failure Analysis* (COFA), o princípio analítico adotado é convergente com ferramentas como a FMEA, que permitem organizar de maneira lógica e multidisciplinar as informações necessárias à tomada de decisão no âmbito da MCC.

Na FMEA a priorização dos modos de falha é realizada por meio da atribuição de três índices qualitativos padronizados — Severidade (S), Ocorrência (O) e Detecção (D) — que permitem avaliar de forma estruturada o risco associado a cada modo de falha. Esses índices são definidos a partir de escalas ordinais com critérios previamente estabelecidos e, posteriormente, combinados para o cálculo do Número de Prioridade de Risco (NPR). De acordo com Fogliatto e Ribeiro (2011), a utilização conjunta desses três fatores possibilita transformar a análise qualitativa das falhas em um procedimento

sistemático de hierarquização de criticidade, apoiando a tomada de decisão em programas de confiabilidade e manutenção.

O índice de Severidade (S) está relacionado à magnitude das consequências provocadas pela falha, considerando seus efeitos sobre o desempenho do sistema, a operação, a segurança e os custos. Segundo Fogliatto e Ribeiro (2011), a severidade deve refletir o impacto do efeito da falha caso ela ocorra, independentemente de sua probabilidade, sendo que falhas que resultam em perda de função crítica, paralisação do equipamento ou comprometimento significativo do desempenho recebem as maiores pontuações na escala, conforme apresentado no Quadro 3.

Quadro 3 – Sugestão de escala para avaliação dos efeitos dos modos de falha.

SEVERIDADE DO EFEITO		ESCALA
MUITO ALTA	Quando compromete a segurança da operação ou envolve	10
	infração a regulamentos governamentais	9
ALTA	Quando provoca alta insatisfação do cliente, por exemplo, um	8
	veículo ou aparelho que não opera, sem comprometer a segurança ou implicar infração	7
MODERADA	Quando provoca alguma insatisfação, devido à queda do	6
	desempenho ou mau funcionamento de partes do sistema	5
BAIXA	Quando provoca uma leve insatisfação, o cliente observa apenas	4
	uma leve deterioração ou queda no desempenho	3
MÍNIMA	Falha que afeta minimamente o desempenho do sistema, e a	2
	maioria dos clientes talvez nem mesmo note sua ocorrência	1

Fonte: Fogliatto e Ribeiro (2011, p.179).

O índice de Ocorrência (O) representa a probabilidade de manifestação da causa da falha, estando associado à frequência esperada com que o modo de falha pode ocorrer. Conforme Fogliatto e Ribeiro (2011), sua atribuição deve, sempre que possível, basear-se em dados históricos, registros de manutenção e experiência operacional, de modo a reduzir subjetividades. Modos de falha recorrentes ou associados a mecanismos de

degradação já observados em campo tendem a receber valores mais elevados nesse critério, conforme apresentado no Quadro 4.

Quadro 4 – Sugestão de escala para avaliação da ocorrência da causa de falha.

OCORRÊNCIA DE FALHA		TAXA DE FALHA	ESCALA
MUITO ALTA	Falhas quase inevitáveis	100/1000	10
		50/1000	9
ALTA	Falhas ocorrem com frequência	20/1000	8
		10/1000	7
MODERADA	Falhas ocasionais	5/1000	6
		2/1000	5
		1/1000	
BAIXA	Falhas raramente ocorrem	0,5/1000	4
		0,1/1000	3
MÍNIMA	Falhas muito improváveis	0,01/1000	2
			1

Fonte: Fogliatto e Ribeiro (2011, p.181).

O índice de Detecção (D) refere-se à capacidade dos mecanismos de controle existentes — como inspeções, testes, monitoramento de variáveis e sistemas de alarme — de identificar a falha ou sua causa antes que seus efeitos se manifestem. Fogliatto e Ribeiro (2011) destacam que esse índice avalia a efetividade dos controles atuais, sendo adotada uma lógica inversa de pontuação: quanto menor a capacidade de detecção antecipada, maior o valor atribuído ao índice. Dessa forma, falhas que não possuem mecanismos de monitoramento ou diagnóstico tendem a apresentar maiores níveis de criticidade sob o ponto de vista da detecção. No Quadro 5 Fogliatto e Ribeiro (2011) sugerem critérios para avaliar a possibilidade de detecção da falha.

Quadro 5 – Sugestão de escala para avaliação da detecção.

POSSIBILIDADE DE DETECÇÃO		ESCALA
MUITO REMOTA	Os controles não irão detectar esse modo de falha, ou não existem controles	10
REMOTA	Os controles provavelmente não irão detectar esse modo de falha	9
		8
BAIXA	Há uma baixa probabilidade de os controles detectarem esse modo de falha	7
		6
MODERADA	Os controles podem detectar o modo de falha	5
		4
ALTA	Há uma alta probabilidade de os controles detectarem o modo de falha	3
		2
MUITO ALTA	É quase certo que os controles irão detectar esse modo de falha	1

Fonte: Fogliatto e Ribeiro (2011, p.196).

A partir da atribuição dos índices de Severidade (S), Ocorrência (O) e Detecção (D), obtém-se o NPR associado ao modo de falha, calculado pelo produto desses três fatores, o qual é utilizado para apoiar a priorização das ações de correção e melhoria (PIMENTA, 2022; FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011).

O cálculo do indicador é realizado conforme o modelo apresentado na Equação (1):

Equação (1) — Número de Prioridade de Risco

$$NPR = S \times O \times D$$

onde:

S = índice de Severidade do efeito da falha;

O = índice de Ocorrência da causa da falha;

D = índice de Detecção da falha antes de sua manifestação funcional.

Quanto maior o valor obtido, maior é a criticidade da falha, devendo este ser avaliado na priorização das ações de tratamento, monitoramento e estratégia de manutenção (PIMENTA,2022).

A Figura 1 ilustra um exemplo da estrutura típica de uma FMEA, evidenciando os principais campos utilizados na análise, tais como o componente avaliado, o modo de falha potencial, os efeitos e as causas associadas à falha, bem como os índices de Severidade (S), Ocorrência (O) e Detecção (D). Observa-se que essa estrutura é diretamente aderente às sete questões fundamentais da MCC, uma vez que permite relacionar de forma sistemática as funções do ativo, suas falhas funcionais, consequências e estratégias de mitigação.

Figura 1 - Estrutura da FMEA

Item	Componente	Modo de Falha Potencial	Efeito da Falha	Causa da Falha	Sev (S)	Ocorr (O)	Detec(D)	RPN	Ação Recomendada
1									
2									
3									

Fonte: Adaptado de Fogliatto e Ribeiro (2011, p.200).

A FMEA apresenta caráter flexível, podendo ser adaptado a distintos contextos e aplicações, conforme o objeto analisado e a fase do ciclo de vida do sistema. O Quadro 6 destaca as principais formas de aplicação da FMEA. Percebe-se que a ferramenta é empregada tanto em etapas de concepção e projeto, quanto na análise de processos produtivos e de ativos físicos em operação, mantendo o foco na identificação estruturada dos modos de falha, de suas causas e de seus efeitos sobre o desempenho do sistema (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011; SMITH; HINCHCLIFFE, 2003).

Quadro 6 – Classificação da FMEA conforme o objeto de análise

TIPO DE FMEA	OBJETO DE ANÁLISE	APLICAÇÃO TÍPICA
APLICADA AO PROJETO	Produtos, sistemas ou equipamentos em fase de concepção ou modificação	Identificação preventiva de falhas potenciais ainda na etapa de projeto, visando eliminar riscos antes da implantação
APLICADA AO PROCESSO	Processos produtivos, operacionais ou de fabricação	Avaliação de falhas associadas às etapas do processo, métodos operacionais, variabilidade e condições de execução
APLICADA A SISTEMAS OU EQUIPAMENTOS	Ativos físicos em operação	Identificação de modos de falha operacionais, suas causas, efeitos e consequências sobre disponibilidade, confiabilidade e desempenho funcional

Fonte: Adaptado de Fogliatto e Ribeiro (2011); Smith e Hinchcliffe (2003).

3 METODOLOGIA

No presente estudo, a lógica da pesquisa-ação foi considerada como referência conceitual e operacionalizada em quatro fases principais: diagnóstico, análise, plano de ação e avaliação. Essa estrutura corresponde a uma adaptação do ciclo clássico da pesquisa-ação descrito na literatura, em que se alternam momentos de investigação da realidade, planejamento, intervenção e reflexão crítica sobre os resultados (Lewin, 1946; Thiollent, 2011).

Na fase de Diagnóstico, procede-se ao levantamento sistemático da situação-problema no contexto real; em seguida, na fase de Análise, os dados coletados são interpretados em conjunto com os atores envolvidos, buscando compreender causas, implicações e prioridades. Neste caso, na análise desenvolveu-se a FMEA. A fase de Plano de Ação corresponde à definição das ações propostas para enfrentamento dos problemas identificados. Nessa pesquisa desenvolveu-se o plano de manutenção. A fase de Avaliação envolve a apreciação crítica dos resultados alcançados e das limitações observadas, possibilitando a retroalimentação do processo em ciclos posteriores, conforme preconizado pelos modelos de pesquisa-ação.

Quanto à natureza, a pesquisa é aplicada, pois busca propor e estruturar melhorias na confiabilidade, disponibilidade e exatidão metrológica de analisadores *on-line*. Quanto aos objetivos, possui caráter descritivo, pois registra, estrutura e analisa sistematicamente modos de falha, estratégias de manutenção e indicadores de desempenho. Quanto à abordagem, combina elementos qualitativos e quantitativos, integrando entrevistas técnicas, diagnósticos de condição, análise documental, registros e análises de falhas e indicadores operacionais.

A unidade de análise do estudo foi composta pelos analisadores *on-line* de processo utilizados no beneficiamento mineral — modelos Courier 6i e PSI300 — considerando seus subsistemas de medição, refrigeração e controle.

No Quadro 7 é apresentado a estrutura da pesquisa-ação, adaptada para a análise da confiabilidade e da exatidão dos analisadores *on-line*.

Quadro 7– Etapas da pesquisa-ação aplicada ao estudo dos analisadores

ETAPA	ATIVIDADE	COMO?	QUEM?	QUANDO?
1. DIAGNÓSTICO	Levantamento exploratório por entrevistas	Entrevistas técnicas não estruturadas realizadas durante intervenções e reuniões de alinhamento	Pesquisador Técnico Sênior de Processo; Engenheiro de Processo; Especialistas Metso	Maio a junho de 2025
	Diagnóstico técnico da condição dos analisadores	Inspeção em campo, verificação de subsistemas críticos, testes funcionais, análise de <i>GAINs</i> , avaliação de desgaste e exatidão metrológica	Pesquisador; Especialistas Metso	Julho de 2025
	Levantamento e organização de registros operacionais	Consolidação de registros manuais de turno, análise de palavras-chave, construção de banco histórico de falhas	Pesquisador	Agosto de 2025
2. ANÁLISE	Desenvolvimento da FMEA	Identificação de funções, modos de falha, causas, efeitos e atribuição de S, O e D; cálculo do NPR	Pesquisador; Especialistas Metso	Setembro de 2025
3. PLANO DE AÇÃO	Desenvolvimento do plano de manutenção	Definição de estratégias de manutenção (preventiva, corretiva estratégica, sobressalentes críticos), estruturação no SAP e definição de treinamentos	Pesquisador; Especialistas Metso	Outubro de 2025
4. AVALIAÇÃO	Avaliação dos resultados	Verificação da aderência ao plano, análise de disponibilidade, calibração e resposta operacional às intervenções	Pesquisador; Técnico Sênior de Processo; Engenheiro de Processo	Novembro a dezembro de 2025

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A coleta de dados foi conduzida em múltiplas etapas. Inicialmente, realizou-se levantamento exploratório por meio de entrevistas técnicas não estruturadas com operadores, técnicos, engenheiros de processo e com especialistas na manutenção destes equipamentos. Segundo Lakatos e Marconi (2017), as entrevistas constituem instrumento relevante para obtenção de informações qualitativas em fases diagnósticas, especialmente quando se pretende captar a percepção dos atores diretamente envolvidos no processo.

Em paralelo, procedeu-se à análise documental, contemplando registros operacionais, relatórios de manutenção, históricos de paradas não programadas e recomendações técnicas dos fabricantes. Essa etapa permitiu a consolidação de

informações objetivas acerca do desempenho histórico dos equipamentos. Na etapa seguinte, foi executado pelo pesquisador em conjunto do especialista da Metso o diagnóstico técnico de campo, com inspeção direta dos analisadores, verificação de componentes críticos, avaliação de desgaste, testes funcionais e análise de condições de medição e calibração. Essa fase caracterizou procedimento de observação técnica sistemática e coleta de dados empíricos (SILVA, 2005).

Posteriormente, foi estruturada a etapa de organização e preparação dos dados, envolvendo extração de registros de indisponibilidade, classificação de falhas, construção de base histórica e transformação de variáveis de *status* em eventos de parada e retorno operacional.

Na fase analítica, aplicou-se a FMEA sob a ótica da MCC, com identificação de modos de falha, causas, efeitos e atribuição estruturada de índices de severidade, ocorrência e detecção. Essa etapa constituiu o núcleo técnico da análise, servindo de base para priorização de riscos e definição das estratégias de manutenção.

Com base nos resultados obtidos na etapa diagnóstica e analítica, estruturou-se a fase de planejamento das ações de melhoria, contemplando a definição de diretrizes de manutenção preventiva e corretiva, a organização de planos de manutenção por criticidade, a identificação de sobressalentes estratégicos e a elaboração de procedimentos técnicos padronizados.

Adicionalmente, foi proposto um modelo sistematizado de monitoramento de falhas, por meio da consolidação de variáveis de *status* e indicadores de desempenho anteriormente inexistentes.

Por fim, procedeu-se à avaliação dos resultados sob a perspectiva do cumprimento do plano de ação e da aplicabilidade das melhorias propostas. Considerando a inexistência prévia de ferramenta estruturada para diagnóstico sistemático da confiabilidade e exatidão metrológica, os indicadores foram desenvolvidos e consolidados durante a condução do estudo.

Assim, a etapa avaliativa concentrou-se na verificação da aderência das ações planejadas, na análise da resposta técnica dos analisadores às intervenções realizadas e na validação operacional do modelo proposto junto à equipe de processo e laboratório. Essa fase configurou-se como validação técnica do método desenvolvido, em consonância com a abordagem da pesquisa-ação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Diagnóstico

4.1.1 Entendimento do contexto e propósito

- **Apresentação da empresa pesquisada**

A empresa analisada neste estudo é uma organização brasileira de capital fechado atuante no setor de mineração, com operações voltadas à produção de *sinter feed e pellet feed* a partir do beneficiamento de minérios itabiríticos de baixo teor. Por meio de processos de concentração mineral, o minério é transformado em produtos com elevado teor de ferro, atendendo às especificações do mercado siderúrgico.

A organização opera com um processo produtivo integrado, estruturado para garantir eficiência operacional, padronização da qualidade e otimização logística ao longo de toda a cadeia do minério de ferro. As etapas de lavra e beneficiamento mineral estão localizadas no estado de Minas Gerais, onde o minério é extraído e submetido a processos como os de britagem, moagem, concentração e filtragem. Após o beneficiamento, o produto é transferido para unidades subsequentes de processamento por meio de soluções logísticas compatíveis com a escala operacional da empresa.

Na etapa subsequente, o concentrado é processado e classificado em diferentes produtos comerciais, como *sinter feed e pellet feed*, sendo sua produção ajustada conforme a demanda dos clientes. Por fim, a produção é destinada ao mercado por meio de sistemas logísticos compatíveis com a escala operacional da organização, assegurando o escoamento com elevada confiabilidade.

Este trabalho foi desenvolvido em uma unidade de beneficiamento mineral localizada no estado de Minas Gerais. Nessa unidade, o processo de beneficiamento do minério de ferro contempla etapas como moagem e flotação, nas quais são empregados analisadores *on-line* de processo para monitoramento contínuo da composição química e da granulometria da polpa de minério. Esses sistemas permitem acompanhamento em tempo quase real das variáveis, contribuindo para maior estabilidade operacional e melhor desempenho do processo.

Cada uma das duas usinas de beneficiamento possui dois analisadores *on-line* dedicados: um analisador Courier 6i, para análise de teor mineral de 12 fluxos do

processo, e um analisador PSI300, responsável pela análise granulométrica dos fluxos de moagem primária e secundária, totalizando quatro analisadores em operação na unidade.

Inicialmente, a gestão técnica e a operação desses analisadores estavam sob responsabilidade das equipes do laboratório físico-químico, que conduziam tanto a rotina operacional quanto as rotinas de manutenção. Ao final de 2024, foi implementada uma reestruturação organizacional com redefinição de responsabilidades: as atividades de manutenção, calibração, diagnóstico de falhas e gestão técnica dos ativos passaram a ser atribuídas à equipe de Instrumentação, enquanto a operação dos analisadores e do sistema amostral permaneceu sob responsabilidade do laboratório. Esse novo arranjo organizacional visou aprimorar a governança técnica dos ativos e estruturar formalmente a gestão da manutenção dos analisadores.

- **Processo de beneficiamento do minério**

O beneficiamento de minérios compreende o conjunto de operações unitárias aplicadas ao material extraído com o objetivo de ajustar sua granulometria, concentrar os minerais de interesse e adequar o produto às especificações industriais. Essas operações têm como finalidade promover a separação entre o mineral útil e a ganga, por meio de etapas físicas e físico-químicas integradas (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

A etapa inicial é composta pelas operações de britagem e moagem, responsáveis pela cominuição do minério e pela liberação dos minerais. A redução de tamanho é conduzida de modo controlado, buscando atingir a granulometria adequada às etapas subsequentes de classificação e concentração. Conforme descrito por Luz, Sampaio e França (2010), a cominuição é uma das fases de maior consumo energético do processo, devendo ser otimizada para garantir eficiência metalúrgica e energética.

Após a moagem, o material é submetido a etapas de classificação granulométrica, tipicamente realizadas por meio de hidrociclones, que promovem a separação entre frações grossas e finas e mantêm o equilíbrio operacional do circuito fechado de moagem. O controle da distribuição granulométrica nessa etapa é crítico, pois influencia diretamente o desempenho das etapas de concentração e a eficiência global do processo.

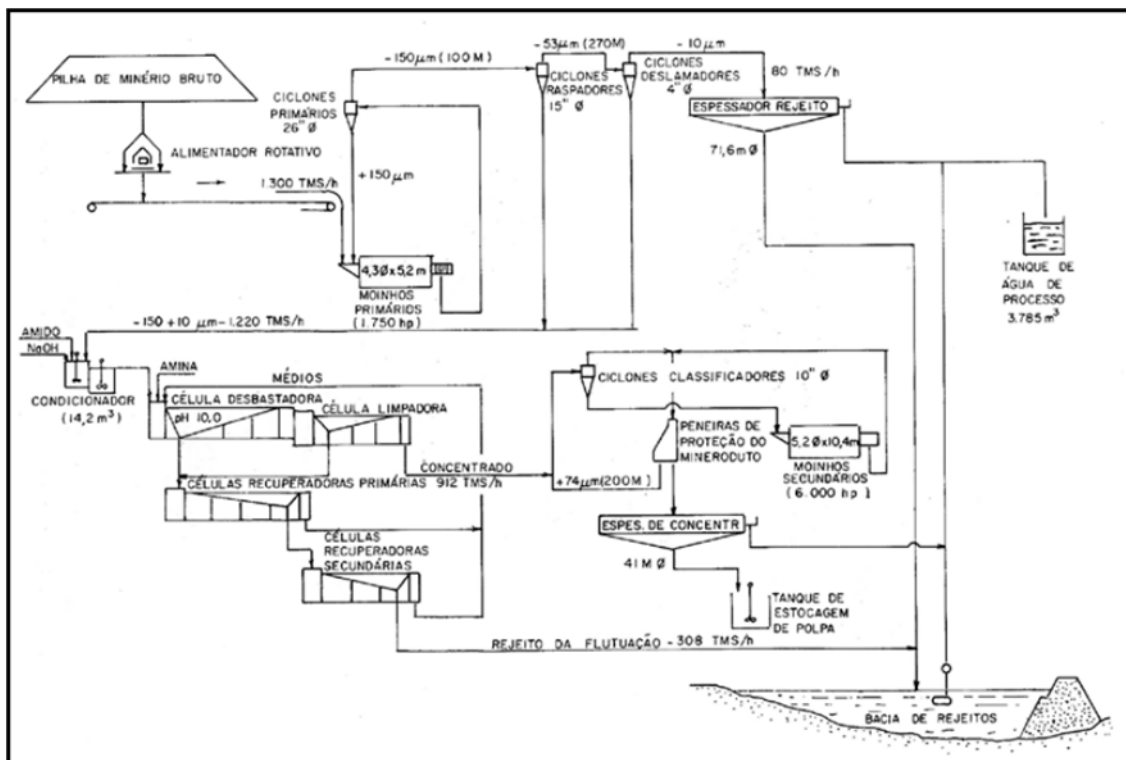
Na sequência, o minério segue para as etapas de concentração, nas quais ocorre a separação seletiva entre os minerais portadores de ferro e os minerais de ganga. No contexto dos minérios itabiríticos processados em plantas industriais, destaca-se a aplicação da flotação, especialmente para a remoção de sílica, constituindo uma das

operações mais sensíveis do circuito. A flotação apresenta elevada dependência de variáveis como granulometria, composição química, dosagem de reagentes e condições hidrodinâmicas, sendo diretamente impactada pela qualidade e pela frequência das medições de processo. Estudos aplicados em plantas industriais demonstram que a rapidez e a exatidão das análises *on-line* estão fortemente associadas ao desempenho técnico e econômico dos circuitos de flotação (REMES *et al.*, 2007).

Após a concentração, o processo contempla as etapas de desaguamento, por espessamento e posterior transporte do concentrado para etapas subsequentes da cadeia produtiva. Paralelamente, os rejeitos gerados passam por sistemas de espessamento e filtragem para destinação controlada, enquanto parte da água de processo é recuperada e recirculada, contribuindo para a eficiência hídrica da operação.

A Figura 2 apresenta um fluxograma representativo de circuito de beneficiamento, com etapas de moagem, classificação por ciclones, flotação e espessamento, compatível com a lógica operacional adotada em plantas de concentração de minério de ferro itabirítico.

Figura 2 - Fluxograma típico de beneficiamento de minério de ferro



Fonte: Luz, Sampaio e França (2010, p. 490)

O processo de beneficiamento caracteriza-se como um sistema altamente integrado e sensível à variabilidade das condições de alimentação e de operação. Nesse contexto, o monitoramento contínuo das variáveis químicas e granulométricas por meio de analisadores *on-line* — como os analisadores Courier 6i e PSI300 utilizados na planta — assume papel estratégico no controle, na estabilidade e na otimização do processo, fornecendo suporte técnico às decisões operacionais em intervalos significativamente menores que os obtidos por análises laboratoriais convencionais. Os tópicos subsequentes apresentam os limites de desenvolvimento dessa pesquisa, bem como o funcionamento dos analisadores *on-line* Courier 6i e PSI300.

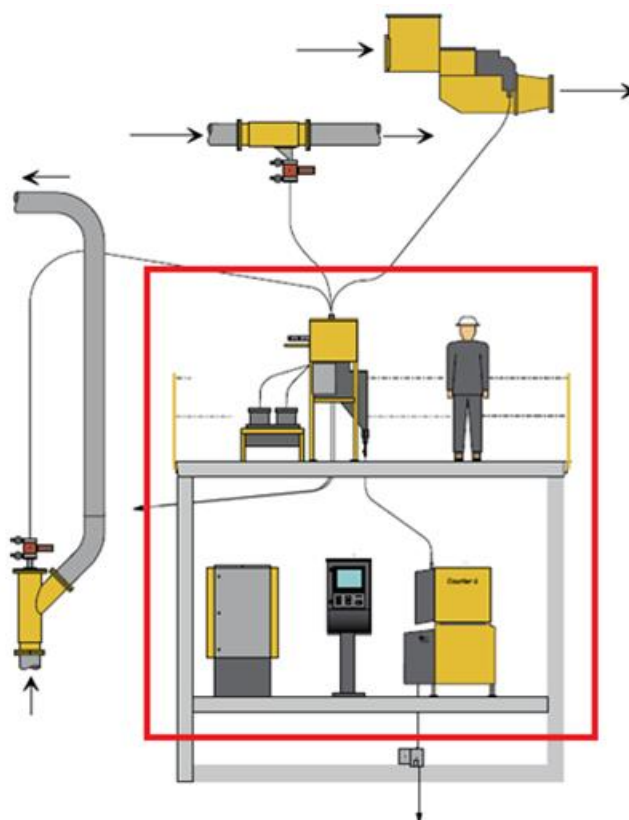
- **Limites de atuação e análise**

A análise *on-line* em plantas de beneficiamento mineral constitui um sistema tecnológico complexo, composto por dois grandes subsistemas interdependentes: o sistema amostral e o sistema analisador.

O sistema amostral é constituído pelos amostradores de polpa instalados nas tubulações de processo, responsáveis pela extração representativa da amostra a ser analisada. Esses equipamentos são projetados e fabricados de acordo com os requisitos estabelecidos na norma ABNT NBR ISO 16742:2021 – Minérios de ferro — Amostragem de polpas, que define critérios para garantir representatividade e integridade da amostra coletada.

O sistema analisador, por sua vez, é composto pelos módulos de preparação secundária da amostra, unidades de medição, sistemas de controle, interface com o usuário e integração com sistemas supervisórios, conforme ilustrado na Figura 3. A área destacada pelo quadrado vermelho representa a delimitação deste estudo.

Figura 3 – Sistema de análise para polpa de minério de ferro



Fonte: Metso, (2025, p.6)

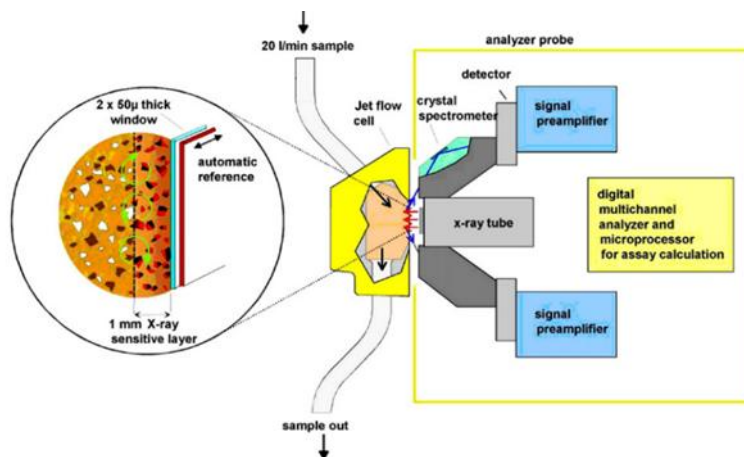
Embora o sistema amostral exerça influência direta na exatidão dos resultados analíticos, sua complexidade técnica e variáveis operacionais justificariam um estudo específico sobre seu impacto na representatividade e na incerteza de medição. Assim, o presente trabalho limita-se à análise dos analisadores *on-line* propriamente ditos, com foco em seus subsistemas internos de medição, controle, confiabilidade operacional e desempenho metrológico.

- **Analisador *on-line* Courier 6i**

O Courier 6i é um analisador químico *on-line* baseado na técnica de fluorescência de raios X dispersiva em comprimento de onda (WDXRF). Seu princípio de funcionamento consiste em excitar os átomos presentes na amostra por meio de um feixe de raios X gerado por um tubo específico, conforme Figura 4. Quando os átomos absorvem essa energia, elétrons das camadas internas são deslocados de suas órbitas. O rearranjo eletrônico subsequente resulta na emissão de fótons de fluorescência de raios

X, cuja intensidade é diretamente proporcional à concentração do elemento na amostra (METSO, 2025).

Figura 4 - Esquema de medição XRF



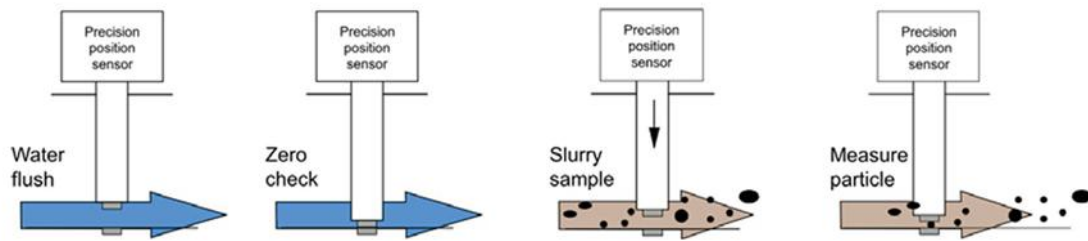
Fonte: REMES *et al.*, (2007, p. 1056)

O sistema de detecção utiliza cristais analisadores que atuam como filtros espectrais, selecionando apenas o comprimento de onda característico de cada elemento de interesse. Por exemplo, o cristal permite que apenas a fluorescência característica do ferro (Fe) seja transmitida ao detector. Os fótons filtrados são então detectados por contadores proporcionais selados, que convertem cada fóton incidente em um pulso elétrico. Um sistema eletrônico multicanal processa esses sinais, contabilizando a intensidade de pulsos para cada elemento, o que permite determinar a concentração química da amostra em tempo real (METSO, s.d.).

- **Analizador *on-line* PSI300**

O PSI300 é um analisador *on-line* utilizado para monitorar continuamente o tamanho de partículas em circuitos de moagem primária e secundária. Seu princípio de funcionamento, conforme apresentado na Figura 5, baseia-se em uma sonda mecânica que realiza medições diretas na polpa. Essa sonda utiliza um micrômetro eletrônico para detectar o deslocamento da ponta de medição em relação ao ponto zero, à medida que as partículas passam pelo sensor. O sistema realiza aproximadamente 120 medições consecutivas por ciclo, registrando variações no deslocamento da sonda provocadas pelas partículas presentes na amostra. A partir dessas medições, o instrumento calcula o tamanho médio das partículas e gera a distribuição granulométrica em tempo real, permitindo ajustes automáticos e contínuos no circuito de moagem (METSO, 2025).

Figura 5 - Esquema de medição do PSI300



Fonte: Metso, (2025, p.5)

Uma vez estabelecida a base tecnológica dos analisadores Courier 6i e PSI 300, bem como sua relevância estratégica para o beneficiamento de itabiritos, a pesquisa avançou para a etapa de diagnóstico situacional, caracterizada pela construção colaborativa do entendimento sobre a condição real dos ativos em campo. Para que as ações propostas fossem tecnicamente fundamentadas, tornou-se necessário consolidar evidências empíricas relativas à rotina de manutenção, histórico de falhas e desempenho operacional dos equipamentos.

4.1.2 Definição da equipe, objetivos e expectativas

A proposição de planos de manutenção para os analisadores *on-line* Courier 6i e PSI300 surgiu da necessidade de elevar a disponibilidade operacional e a exatidão das medições utilizadas no controle do processo. Para tanto, estruturou-se uma equipe multidisciplinar, reunindo profissionais diretamente envolvidos com a manutenção, operação e otimização do processo, além do suporte técnico do fabricante dos equipamentos.

A constituição de uma equipe com diferentes especialidades teve como finalidade integrar visões complementares — técnica, operacional e de processo — permitindo uma análise mais abrangente dos modos de falha, de suas causas e de seus impactos no desempenho dos analisadores. As atividades foram conduzidas por meio de reuniões técnicas e interações periódicas, nas quais foram discutidos históricos de falhas, limitações operacionais, riscos associados à obsolescência e oportunidades de melhoria.

O desenvolvimento das análises de confiabilidade e da FMEA contou com a participação dos seguintes profissionais:

i. Técnico especialista de instrumentação (pesquisador): responsável pela manutenção dos analisadores *on-line*, execução das intervenções técnicas, levantamento

de histórico de falhas, definição de tarefas de manutenção e validação técnica dos modos de falha identificados. Esse técnico é responsável pela pesquisa, atuando tanto na coleta quanto na validação técnica das informações levantadas.

ii. Técnico sênior de processo: responsável pela operação dos analisadores e do sistema amostral associado, contribuindo com a visão operacional, identificação de sintomas de falha em campo e impactos das indisponibilidades nas rotinas de controle de processo;

iii. Engenheiro de processo: responsável pela análise de desempenho do circuito de beneficiamento, avaliação dos impactos das falhas dos analisadores na estabilidade operacional e na qualidade das variáveis de processo, bem como na priorização das ações sob a ótica de otimização operacional;

iv. Engenheiro de suporte Metso: agente externo, que contribui com recomendações de manutenção, listas de sobressalentes críticos, diagnóstico de falhas complexas e diretrizes de atualização tecnológica dos analisadores. O acesso a esse profissional é viabilizado por meio de contratos de manutenção, que incluem consultorias técnicas especializadas.

A formação dessa equipe permitiu consolidar o conhecimento técnico e operacional necessário para a condução estruturada da pesquisa-ação, garantindo que as decisões relacionadas às estratégias de manutenção fossem fundamentadas tanto em dados históricos quanto em experiência prática e recomendações de engenharia.

Os objetivos específicos estabelecidos para essa pesquisa estão apresentados no Quadro 8.

Quadro 8 – Objetivos específicos da pesquisa

Mapear os principais modos de falha dos analisadores *on-line* Courier 6i e PSI300;

Classificar os modos de falha por criticidade com base no NPR;

Definir estratégias de manutenção alinhadas à criticidade e obsolescência;

Estruturar planos de manutenção preventiva e listas de sobressalentes críticos;

Implantar monitoramento sistemático de falhas e indisponibilidade via variáveis de *status*;

Estabelecer metas de disponibilidade e exatidão metrológica dos analisadores;

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Além dos objetivos técnicos definidos, estabeleceu-se como expectativa a estruturação de um modelo sistematizado de diagnóstico e gestão da confiabilidade dos analisadores, com formalização de indicadores técnicos para monitoramento de falhas e suporte à definição de estratégias de manutenção alinhadas à criticidade e à exatidão metrológica dos equipamentos. Esperava-se, ainda, fortalecer a governança técnica sobre ativos classificados como críticos e parcialmente obsoletos, reduzir a dependência predominante de manutenção corretiva e ampliar a integração entre manutenção, operação e suporte do fabricante, promovendo decisões fundamentadas em dados estruturados e critérios técnicos consolidados.

4.1.3 Levantamento exploratório por entrevistas

Para o desenvolvimento deste trabalho, o levantamento inicial das informações foi realizado por meio de entrevista técnicas não estruturadas com as equipes de laboratório e com o suporte técnico do fabricante, ocorridas durante intervenções de manutenção corretiva e preventiva, bem como em reuniões de alinhamento para definição de metas e expectativas quanto à utilização dos analisadores. Essas interações, permitiram compreender a rotina operacional, as dificuldades enfrentadas e as práticas adotadas na gestão dos equipamentos.

A partir dessas discussões, constatou-se que os analisadores não possuíam plano estruturado de manutenção, bem como sistema formal de registro e gestão do histórico de falhas. O Quadro 9 apresenta a síntese dos principais pontos identificados nessa etapa diagnóstica.

Quadro 9 – Síntese dos diagnósticos obtidos nas entrevistas

ASPECTO AVALIADO	SITUAÇÃO DIAGNOSTICADA	AÇÃO RECOMENDADA/ DEFINIÇÃO
PLANOS DE MANUTENÇÃO	Inexistência de planos de manutenção para os analisadores Courier 6i e PSI 300. Atuação apenas corretiva.	Desenvolvimento e implementação de planos de manutenção baseados em MCC.
GESTÃO DE SOBRESSALENTES	Existência de poucos sobressalentes, restritos a itens de baixo valor agregado.	Definição de lista de sobressalentes críticos e estabelecimento de estoque mínimo.
SOBRESSALENTES CRÍTICOS	Ausência total de sobressalentes críticos (ex.: canais de medição, tubo e gerador de raio X).	Aquisição e padronização de sobressalentes críticos conforme recomendação do fabricante.
MONITORAMENTO DE FALHAS / HISTÓRICO DE PARADAS	Monitoramento das paradas inexistente.	Utilização das variáveis de <i>status</i> para monitoramento preditivo.
TEMPO DE VIDA DOS EQUIPAMENTOS	Equipamentos classificados pelo fabricante como obsoletos, com redução gradual do suporte e disponibilidade de peças.	Estruturação de estratégia de extensão de vida útil, gestão de obsolescência e avaliação de alternativas tecnológica

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Além dos aspectos sintetizados no Quadro 9, o diagnóstico evidenciou duas condições operacionais classificadas como críticas em termos de risco à disponibilidade dos analisadores.

A primeira refere-se ao sistema de refrigeração (chiller) do analisador Courier 6i, que apresentava histórico de falhas recorrentes sem a existência de unidade sobressalente disponível, configurando elevado risco de indisponibilidade prolongada do equipamento em caso de nova ocorrência.

A segunda condição está relacionada à pastilha de medição do analisador PSI300, componente essencial ao funcionamento do sistema de medição. A ausência de sobressalentes em estoque já havia resultado, em período anterior, na indisponibilidade do equipamento por aproximadamente 90 dias, evidenciando vulnerabilidade operacional

e significativa dependência dos prazos de fornecimento do fabricante, que podem ultrapassar 90 dias mesmo para itens classificados como não críticos.

4.1.4 Diagnóstico técnico da condição dos analisadores

Nesta etapa, foi realizada uma avaliação técnica detalhada dos analisadores *on-line* Metso PSI300 e Courier 6i, conduzida pelo pesquisador em conjunto com engenheiros de suporte da Metso. Essa avaliação foi motivada pela recente transferência da gestão de manutenção dos analisadores para a equipe de Instrumentação, tornando necessária uma análise estruturada das condições técnicas, dos riscos operacionais e do estado geral dos equipamentos.

O objetivo dessa etapa foi identificar condições de falha, degradação de componentes e fatores que impactavam diretamente a confiabilidade operacional e a exatidão das medições.

No analisador Metso PSI300, avaliou-se o estado de desgaste das pastilhas do apalpador, componente principal do conjunto de medição. Identificou-se desgaste em estágio inicial, o que demandou ajustes de zero e *span* do sensor LVDT para restabelecimento da precisão do sinal de medição. Adicionalmente, constatou-se desgaste na válvula de dreno da caixa de amostra e vazamento interno em um dos cilindros responsáveis pelo corte da amostra, comprometendo o curso adequado do êmbolo.

No analisador Metso Courier 6i, foi inspecionado o sistema de refrigeração, sendo o chiller identificado como ponto crítico, em razão do histórico de falhas recorrentes e da inexistência de unidade sobressalente disponível, permanecendo como pendência para aquisição. No sistema de medição, observou-se variação anormal dos ganhos (*GAINS*) dos canais de medição, resultando em redução significativa da exatidão das análises composicionais. Além disso, a Interface Homem-Máquina (IHM) apresentava episódios recorrentes de travamento, exigindo reinicializações frequentes para restabelecimento da operação.

No contexto de medição, a exatidão constitui requisito fundamental e está diretamente relacionada ao erro de medição, definido como a diferença entre o valor indicado pelo instrumento e o valor verdadeiro da grandeza medida. Nos analisadores avaliados, a exatidão é verificada por meio do processo de calibração, que consiste na coleta de aproximadamente 30 amostras representativas para construção de modelo

matemático de correlação entre os sinais instrumentais e os resultados laboratoriais. Coeficientes de correlação inferiores a 70% são considerados indicativos de degradação funcional, demandando investigação técnica mais aprofundada (METSU, s.d.).

Após as inspeções e intervenções iniciais, realizou-se também a avaliação do estoque de sobressalentes existente. Em conjunto com o fabricante, foi analisada a lista de sobressalentes recomendada para garantir a disponibilidade operacional dos analisadores. Constatou-se a presença apenas de itens de baixo valor agregado — como cilindros pneumáticos, sensores indutivos e válvulas — enquanto nenhum dos componentes críticos recomendados encontrava-se disponível em estoque, corroborando os achados levantados nas entrevistas de diagnóstico iniciais.

4.1.5 Levantamento e organização de registros operacionais

Com o objetivo de iniciar a geração e coleta de dados sobre as ocorrências operacionais, o técnico de instrumentação responsável pelos analisadores — e pesquisador deste trabalho — passou a integrar os grupos de comunicação instantânea utilizados pelas equipes do laboratório. Nesses grupos são reportados os principais acontecimentos de cada turno, incluindo falhas, intervenções operacionais e episódios de parada dos analisadores. Essa iniciativa possibilitou o início da avaliação sistemática e da construção do histórico de falhas dos analisadores, suprimindo temporariamente a ausência de registros automatizados nos sistemas corporativos de gestão e supervisão de dados operacionais (*Plant Information Management System – PIMS* e *Manufacturing Execution System – MES*). As informações coletadas por esse meio foram consolidadas e serviram de subsídio às etapas posteriores de análise de criticidade e estruturação do plano de ação.

Realizou-se a sistematização dos registros referentes ao fechamento dos turnos operacionais, obtidos por meio de aplicativo de comunicação instantânea utilizado pelas equipes do laboratório.

A partir desses registros, procedeu-se à organização das informações por meio da identificação de palavras-chave associadas a eventos de indisponibilidade, tais como “manutenção”, “falha”, “*standby*” e “parada”. As ocorrências identificadas foram analisadas individualmente quanto à sua pertinência técnica e classificadas de acordo com o tipo de falha e o componente associado.

Posteriormente, os dados foram preparados para análise, com o registro do tempo de indisponibilidade correspondente a cada evento confirmado, permitindo a consolidação de um banco de dados estruturado para suporte às etapas subsequentes de análise de criticidade e desenvolvimento da FMEA. O resultado dessa consolidação é apresentado no Quadro 10.

Quadro 10 – Amostra do banco de dados consolidado a partir dos registros operacionais

DATA	INÍCIO PARADA	FIM PARADA	EQUIPAMENTO	FALHA	HORAS
27/11/2024	18:43	19:25	Courier	Falta de água	0:42
05/12/2024	14:02	14:30	Courier	Umidade canal	0:28
12/12/2025	22:00	22:40	Courier	Umidade canal	0:40
08/01/2025	17:09	17:53	Courier	Umidade canal	0:44
07/02/2025	01:39	06:29	Courier	Umidade canal	4:50
11/02/2025	07:15	12:12	Courier	Chiller	4:57
13/02/2025	13:00	16:00	Courier	Chiller	3:00
27/02/2025	01:16	02:40	Courier	Umidade canal	1:24
28/02/2025	10:22	11:02	Courier	Umidade canal	0:40
08/03/2025	03:35	09:30	PSI300	Desvio padrão alto	5:55
11/03/2025	08:18	11:13	PSI300	Desvio padrão alto	2:55

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Entretanto, a metodologia inicial de coleta mostrou-se limitada para uma análise mais aprofundada do desempenho e da confiabilidade dos equipamentos, sobretudo em razão da dependência de registros manuais, da ausência de padronização das informações e da possibilidade de subnotificação de eventos operacionais.

Diante das limitações identificadas — especialmente a dependência de registros manuais, a ausência de padronização e a possibilidade de subnotificação de eventos —

definiu-se, como parte do plano de ação estruturado na pesquisa, a implantação de um sistema automatizado de monitoramento das condições operacionais dos analisadores.

Essa ação teve como objetivo estabelecer uma base de dados confiável, padronizada e rastreável para apuração da indisponibilidade, reduzindo a subjetividade dos registros manuais e fortalecendo a gestão da confiabilidade dos equipamentos.

Para viabilizar essa entrega, realizou-se, em conjunto com o corpo de engenharia da Metso, uma avaliação detalhada das variáveis internas de *status* disponíveis nos analisadores *on-line*, buscando identificar parâmetros técnicos capazes de representar automaticamente seus estados operacionais.

Com base nessa análise, realizou-se o cadastro e a integração dessas variáveis aos sistemas de automação da planta e, posteriormente, aos sistemas corporativos de gestão de dados PIMS e MES.

Os analisadores comunicam-se com o sistema de automação por meio do protocolo Modbus TCP, padrão amplamente utilizado em redes industriais para troca de informações entre equipamentos eletrônicos. Nesse protocolo, os estados operacionais não são transmitidos de forma descritiva, mas sim como valores numéricos binários armazenados em registradores digitais.

Cada registrador é composto por um conjunto de bits (0 e 1), sendo que cada bit representa uma condição específica do equipamento. Dessa forma, tornou-se necessário desmembrar o valor numérico recebido em seus respectivos bits individuais, associando cada posição binária a uma condição operacional distinta — como estado normal, advertência, alarme ou manutenção — conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Variável de *status* do analisador courier

317AIT002.BC		
317AIT002.BC.1 Analisador Courier inicializando	11	1001
317AIT002.BC.2 Analisador Courier normal	1	1
317AIT002.BC.3 Analisador Courier em advertência	1	0
317AIT002.BC.4 Analisador Courier em alarme	0	0
317AIT002.BC.5 Analisador Courier em manutenção	0	1
	0	0

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A partir do desmembramento das variáveis de *status*, as falhas passaram a ser monitoradas automaticamente por meio da análise dos bits associados à condição operacional do analisador, em especial pela variável 317AIT002.BC.2, denominada “Analisador Courier Normal”. Sempre que ocorria a transição do bit do estado 1 para 0, era registrado o início de uma falha, com a respectiva marcação do horário inicial. De forma análoga, a transição do bit do estado 0 para 1 indicava o encerramento da falha, sendo registrado o horário final correspondente — conforme ilustrado na Figura 7.

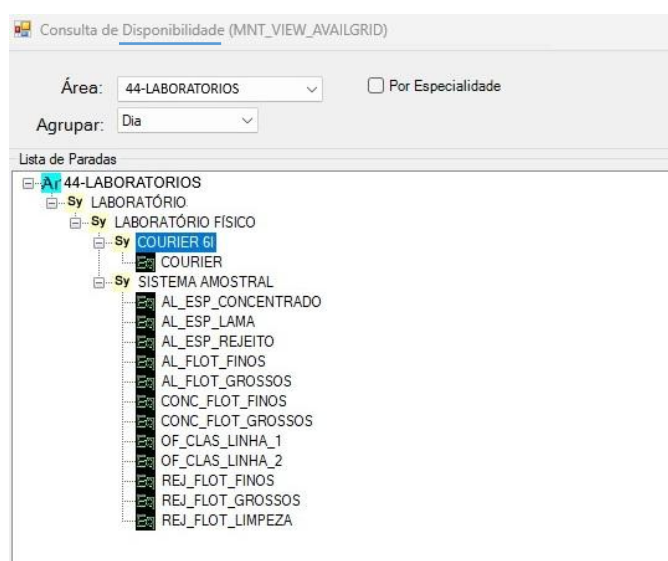
Figura 7 - Variável de *status* inserida no sistema PIMs

	Nome	Mapa	Descrição	Valor	Nível
	317AIT002.BC	IP_DiscreteMap	COURIER	3	Good
	317AIT002.BC.1	IP_DiscreteMap	COURIER - Inicializando	1	Good
	317AIT002.BC.2	IP_DiscreteMap	COURIER - Normal	1	Good
	317AIT002.BC.3	IP_DiscreteMap	COURIER - Em advertência	0	Good
	317AIT002.BC.4	IP_DISCRETEM/	COURIER - em Alarme	0	Good
	317AIT002.BC.5	IP_DiscreteMap	COURIER - em Manutenção	0	Good

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Esse procedimento possibilitou a apuração automática da indisponibilidade e da disponibilidade operacional dos analisadores, eliminando a dependência de registros manuais, a Figura 8 apresenta a estrutura do MES para apuração da disponibilidade. Dessa forma, passou a ser necessária apenas a classificação das falhas e a identificação do componente responsável pela ocorrência, permitindo análises mais consistentes e confiáveis do desempenho dos equipamentos.

Figura 8 – Apuração da disponibilidade automatizado no sistema MES



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.2 Análise

4.2.1 Desenvolvimento da FMEA

Com base no diagnóstico técnico realizado e no histórico de falhas coletado, evidenciou-se a necessidade de uma avaliação aprofundada dos modos de falha e de seus respectivos efeitos sobre o desempenho dos analisadores. Diante desse contexto, adotou-se, sob a ótica da MCC, a aplicação da FMEA dos analisadores *on-line* Metso Courier 6i e Metso PSI300.

A elaboração do FMEA contemplou os principais subsistemas dos analisadores, com foco concentrado nos sistemas de medição, refrigeração e eletrônica de controle. Para cada modo de falha identificado, foram atribuídos os índices de Severidade (S), Ocorrência (O) e Detecção (D). Os critérios de avaliação dos índices foram adaptados de Fogliatto e Ribeiro (2011), com ajustes específicos para o contexto de obsolescência e criticidade tecnológica dos analisadores *on-line*.

O critério de Severidade (S) considerou, prioritariamente, o impacto da falha na paralisação do analisador e a existência ou não de alternativas substitutivas no mercado, sendo atribuídos maiores valores aos componentes obsoletos, sem substitutos disponíveis e com alto impacto operacional, conforme apresentado na Quadro 11.

Quadro 11 – Critérios para avaliação da severidade (S)

CLASSIFICAÇÃO	CRITÉRIO DE SEVERIDADE	ESCALA (S)
MUITO ALTA	Falha em componente crítico ou obsoleto, sem substituto no mercado, que paralisa totalmente o analisador (ex.: Chiller; Placas de controle e canais de medição proprietários).	9-10
ALTA	Falha que paralisa o analisador, com possibilidade de recuperação apenas via fabricante, com longo prazo de fornecimento. (ex.: tubo de raios X e gerador de alta tensão)	7-8
MODERADA	Falha que compromete a exatidão ou estabilidade das medições, exigindo intervenção corretiva, sem paralisação imediata.	5-6
BAIXA	Falha em componente auxiliar, com impacto limitado na operação e rápida recuperação.	3-4
MÍNIMA	Falha em componente padronizado, com múltiplos fornecedores disponíveis no mercado (ex.: cilindros pneumáticos, válvulas, sensores).	1-2

Fonte: Adaptado de Fogliatto (2011).

A definição do índice de Ocorrência (O) baseou-se no histórico real de falhas dos analisadores, consolidado a partir dos registros operacionais, complementado por validações técnicas realizadas com especialistas da manutenção e com o fabricante dos equipamentos.

Adotou-se como critério uma janela temporal padronizada de 30 dias, considerando a frequência de registros nesse período. Essa abordagem permitiu reduzir a subjetividade na classificação dos modos de falha e assegurar coerência entre os dados históricos levantados e os níveis de ocorrência atribuídos na FMEA, conforme apresentado no Quadro 12.

Quadro 12 – Critérios para avaliação da ocorrência (O)

CLASSIFICAÇÃO	CRITÉRIO DE OCORRÊNCIA	ESCALA (O)
MUITO ALTA	Falha registrada ≥ 4 vezes no período de 30 dias ou com frequência média ≥ 1 ocorrência por semana.	9-10
ALTA	Falha registrada 2 a 3 vezes no período de 30 dias.	7-8
MODERADA	Falha registrada 1 vez no período de 30 dias	5-6
BAIXA	Falha não registrada no período de 30 dias, mas com ocorrência confirmada em meses anteriores ou tecnicamente plausível.	3-4
MÍNIMA	Falha sem registro histórico e considerada pouco provável que ocorra, segundo avaliação técnica conjunta da equipe.	1-2

Fonte: Adaptado de Fogliatto (2011).

O índice de Detecção (D) foi definido com base na capacidade de identificação antecipada dos modos de falha antes da ocorrência da falha funcional, considerando os mecanismos efetivamente disponíveis na planta. Foram avaliadas as rotinas de inspeção técnica, atividades de manutenção preventiva, monitoramento por variáveis de *status* integradas aos sistemas de automação, PIMS e MES, bem como a existência de alarmes e indicadores operacionais associados.

Na FMEA, quanto menor a capacidade de detecção prévia, maior o índice atribuído, por representar maior risco de ocorrência não identificada. Os critérios adotados estão apresentados no Quadro 13.

Quadro 13 – Critérios para avaliação da detecção (D)

CAPACIDADE DE DETECÇÃO	CRITÉRIO PARA AVALIAÇÃO DA DETECÇÃO	ESCALA (D)
MUITO BAIXA	Falha não detectável por manutenção preditiva, variáveis de <i>status</i> ou inspeções; perceptível apenas após a falha funcional.	9-10
BAIXA	Falha com baixa probabilidade de detecção antecipada, dependente de inspeções pontuais ou relatos operacionais.	7-8
MODERADA	Falha detectável por inspeções periódicas, análise de tendências ou desvios operacionais.	5-6
ALTA	Falha detectável por variáveis de <i>status</i> , alarmes ou indicadores integrados aos sistemas PIMS e MES.	3-4
MUITO ALTA	Falha facilmente detectável por monitoramento contínuo, com alarme claro e identificação automática.	1-2

Fonte: Adaptado de Fogliatto (2011).

A partir da atribuição dos índices de Severidade (S), Ocorrência (O) e Detecção (D), foi calculado o Número de Prioridade de Risco (NPR) para cada modo de falha, por meio da relação $NPR = S \times O \times D$.

Os modos de falha que apresentaram maiores valores de NPR foram priorizados para definição das estratégias de manutenção, por representarem a combinação simultânea de alto impacto operacional, maior frequência de ocorrência e menor capacidade de detecção prévia, configurando, portanto, maior exposição ao risco operacional e à indisponibilidade prolongada dos analisadores.

A FMEA desenvolvida pela equipe técnica multidisciplinar para o analisador *on-line* Metso PSI300 é apresentada no Quadro 14.

Quadro 14 –FMEA analisador *on-line* Metso PSI300

ITEM	COMPONENTE	MODO DE FALHA POTENCIAL	EFEITO DA FALHA	CAUSA DA FALHA	S	O	D	NPR	AÇÃO RECOMENDADA
1	Pastilha de Medição	Sujeira / Encrustamento	Erro de medição	Baixa pressão de água/ Limpeza ineficiente	6	9	2	108	Aumentar a pressão da água. Aumentar a frequência de limpeza do analisador
	Pastilha de Medição	Desgaste	Erro de medição	Abrasão do material analisado.	6	8	6	288	Substituição da pastilha.
	Sensor LVDT	Travamento	Erro de medição ou instabilidade	Contaminação com polpa de minério, deformação mecânica, instalação inadequada	6	2	4	48	Substituição da Haste de medição
2	Sensor LVDT	Queima/ Perda do Sinal eletrônico	Perda total do sinal ou leitura errática	Curto-circuito, fadiga mecânica, interferência eletromagnética	7	2	2	28	Substituição do sensor
	Sensor LVDT	Erro de Medição	Cálculo de granulometria errado	Ajustes de zero e <i>span</i> errados.	6	8	6	288	Inspeção periódica de alinhamento e verificação de calibração
3	PLC	Erro de processamento	Valor calculado incorreto	Lógica incorreta, sobre aquecimento	7	1	8	56	Revisão de lógica ou substituição por uma versão mais nova e em último caso substituir a CPU.
	PLC	Falha de comunicação	Dados inconsistentes ou congelados	Ruído, falha de rede	7	1	10	70	Verificar o cabo serial, atualizar a lógica e em último caso substituir a CPU.
	PLC	Queima	Parada total do sistema	Sobrecarga / Curto-circuito	10	2	10	200	Substituição por sobressalente.

Quadro 14 –FMEA analisador *on-line* Metso PSI300 (Continuação)

<i>ITEM</i>	<i>COMPONENTE</i>	<i>MODO DE FALHA POTENCIAL</i>	<i>EFEITO DA FALHA</i>	<i>CAUSA DA FALHA</i>	<i>S</i>	<i>O</i>	<i>D</i>	<i>NPR</i>	<i>AÇÃO RECOMENDADA</i>
4	IHM	Travamento	Parada parcial do sistema	Sobreaquecimento/ Falta de Memória RAM	9	10	7	630	Limpeza semestral e formatação quando necessário.
	IHM	Corromper sistema	Parada parcial do sistema	Queima do HD/ Falha Geral do Sistema	9	6	10	540	Necessário a troca do HD e reinstalar o sistema.
	IHM	Erro de processamento	Valor calculado incorreto	Parametrização incorreta, versão de firmware incompatível	6	3	10	180	Necessário revisar a configuração e ou reinstalar o sistema
	IHM	Queima	Parada total do sistema	Sobrecarga / Curto-circuito	10	4	10	400	Substituição por sobressalente.
	IHM	Falha de comunicação	Dados inconsistentes ou congelados	Ruído, falha de rede	7	1	10	70	Verificar o cabo serial, atualizar a lógica e em último caso substituir a IHM.
5	Conversor Modbus	Falha de comunicação	Dados inconsistentes ou congelados	Ruído, falha de rede	7	1	10	70	Verificar o cabo serial, verificar a configuração e em último caso substituir o conversor.
	Conversor Modbus	Queima	Parada parcial do sistema	Sobrecarga / Curto-circuito	10	4	10	400	Substituição por sobressalente.
6	Atuador Pneumático	Vazamento de ar	Perda de força / Movimento impreciso	Vedações danificadas	4	7	5	140	Inspeção semestral / Substituição de vedações
	Atuador Pneumático	Travamento mecânico	Falha funcional	Sujeira / Corrosão / Falta de lubrificação	4	6	3	72	Lubrificação periódica / Filtragem do ar
7	Solenóide	Bobina queimada	Não comuta / Parada do sistema	Queima da bobina / Travamento do solenóide	3	4	9	108	Inspeção semestral / Instalar filtro de ar
	Solenóide	Êmbolo travado	Vazamento / Falha de comutação	Contaminação / Falta de manutenção	3	3	6	54	Inspeção visual / Limpeza do filtro de ar

Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

Observa-se que os maiores valores de NPR concentram-se nos modos de falha associados à IHM, especialmente nos casos de travamento e corrupção do sistema, evidenciando elevado risco operacional decorrente da combinação entre alta severidade, recorrência e baixa capacidade de detecção antecipada. Esses resultados reforçam a criticidade dos componentes eletrônicos obsoletos e justificam a priorização de ações estratégicas relacionadas à gestão de sobressalentes e à avaliação de atualização tecnológica.

Com base na priorização obtida por meio do RPN, as ações de manutenção foram estruturadas de forma diferenciada: componentes eletrônicos classificados como críticos passaram a compor lista estratégica de sobressalentes, enquanto itens de desgaste, como pastilhas e atuadores, foram incorporados aos planos de manutenção preventiva sistemática.

De forma análoga, desenvolveu-se uma FMEA para o analisador *on-line* Metso Courier 6i, considerando-se sua elevada criticidade e o estágio de obsolescência declarado pelo fabricante. A análise concentrou-se, principalmente, nos sistemas de medição por fluorescência de raios X (XRF), no sistema de refrigeração, responsável pela estabilidade térmica dos componentes, e na eletrônica de controle, incluindo canais de medição, interface homem-máquina e sistemas de comunicação.

A FMEA desenvolvida pela equipe técnica multidisciplinar para o analisador *on-line* Metso Courier 6i é apresentada no Quadro 15. A identificação dos modos de falha levou em conta o histórico real de paradas, os registros de indisponibilidade operacional e as limitações relacionadas à disponibilidade de sobressalentes no mercado

Quadro 15 – FMEA do analisador Metso Courier 6i

ITEM	COMPONENTE	MODO DE FALHA POTENCIAL	EFEITO DA FALHA	CAUSA DA FALHA	S	O	D	RPN	AÇÃO RECOMENDADA
1	Tubo de Raios-X	Sobreaquecimento	Desligamento / Danos internos	Falha no resfriamento	8	5	4	160	Verificação mensal das temperaturas
	Tubo de Raios-X	Desgaste	Curto-circuito / Danos internos	Envelhecimento / desgaste	8	5	8	320	Verificação semestral das correntes e intensidade da radiação / substituição a cada 3 anos, conforme recomendação do fabricante
2	Gerador de Alta Tensão	Instabilidade na saída	Oscilação de tensão e corrente / Danos ao tubo	Componentes desgastados / Instabilidade da rede	8	2	5	80	Monitoramento da corrente e da tensão na IHM do analisador
	Gerador de Alta Tensão	Queima	Parada total do sistema	Sobrecarga / Curto-circuito	8	7	2	112	Instalação de UPS no sistema elétrico
3	Placas de Controle	Queima	Parada total do sistema	Sobrecarga / Curto-circuito	10	4	10	400	Limpeza semestral e substituição quando necessário.
4	Canais de medição	Vazamento do gás padrão / Instabilidade do espectro	Oscilação dos <i>GAINs</i> / Perda de exatidão / Desarme do canal	Envelhecimento de conexões internas / falha de vedação / degradação do detector	9	6	9	486	Monitoramento periódico dos <i>GAINs</i> e do espectro; manter canal sobressalente em estoque estratégico
	Canais de medição	Queima do canal eletrônico	Paralisação total da medição do elemento associado	Falha eletrônica interna / sobrecarga / obsolescência	10	6	9	540	Aquisição e manutenção de sobressalente crítico; avaliação de atualização tecnológica

Quadro 15 – FMEA do Analisador Metso Courier 6i (Continuação)

ITEM	COMPONENTE	MODO DE FALHA POTENCIAL	EFEITO DA FALHA	CAUSA DA FALHA	S	O	D	RPN	AÇÃO RECOMENDADA
5	IHM	Travamento	Parada parcial do sistema	Sobreaquecimento/ Falta de Memória RAM	9	7	7	441	Limpeza semestral e formatação quando necessário.
	IHM	Erro de processamento	Valor calculado incorreto	Parametrização incorreta, versão de firmware incompatível	9	7	10	630	Necessário revisar a configuração e ou reinstalar o sistema
	IHM	Corromper sistema	Parada parcial do sistema	Queima do HD/ Falha Geral do Sistema	9	7	10	630	Necessário a troca do HD e reinstalar o sistema.
	IHM	Queima	Parada parcial do sistema	Sobrecarga / Curto-circuito	10	2	10	200	Substituição por sobressalente.
6	Chiller	Queima	Parada total do sistema	Queima / Queima bomba /Queima compressor	8	5	5	200	Manutenção trimestral, limpeza e aquisição de sobressalente reserva
	Chiller	Baixa eficiência de refrigeração	Superaquecimento do Tubo de Raio x	Baixa carga de gás / Falha ventiladores	8	6	4	192	Manutenção trimestral, limpeza e reposição de gás
7	Atuador Pneumático	Vazamento de ar	Perda de força / Movimento impreciso	Vedações danificadas	4	7	5	140	Inspeção semestral / Substituição de vedações
	Atuador Pneumático	Travamento mecânico	Falha funcional	Sujeira / Corrosão / Falta de lubrificação	4	6	3	72	Lubrificação periódica / Filtragem do ar
9	Solenóide	Bobina queimada	Não comuta / Parada do sistema	Queima da bobina / Travamento do solenóide	3	4	9	108	Inspeção semestral / instalar filtro de ar
	Solenóide	Êmbolo travado	Vazamento / Falha de comutação	Contaminação / Falta de manutenção	3	3	6	54	Inspeção visual / Limpeza / Filtro na linha
10	Célula de Medição	Umidade	Parada parcial do sistema	Vazamento no plástico filme	3	10	1	30	Treinar laboratorista na correção dessa falha
	Célula de Medição	Entupimento	Parada parcial do sistema	Material grosseiro/ Baixa pressão de água	3	10	1	30	Treinar laboratorista na correção dessa falha

Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

A análise dos NPRs evidenciou que os maiores riscos do analisador Courier 6i concentram-se nos subsistemas eletrônicos — Canais de medição, placas eletrônicas e na IHM — cujos modos de falha apresentaram os maiores índices de criticidade. Observa-se que tais falhas combinam elevada severidade e baixa capacidade de detecção antecipada, o que reforça a necessidade de estratégias específicas de mitigação, incluindo formação de estoque estratégico e avaliação de atualização tecnológica. Em contrapartida, componentes pneumáticos e eletropneumáticos apresentaram criticidade moderada ou baixa. Assim, tiveram a manutenção preventiva recomendada como política mais adequada e economicamente viável.

4.3 Plano de Ação

4.3.1 Ações prévias para estabelecimento e execução do plano manutenção dos analisadores

A partir do diagnóstico técnico realizado, da consolidação do histórico de falhas e da priorização dos modos de falha por meio das FMEAs desenvolvidas para os analisadores *on-line* Metso PSI300 e Courier 6i, estruturou-se um plano de ação orientado pelos princípios da Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC).

Considerando a impossibilidade de atualização tecnológica imediata dos analisadores — em função de restrições orçamentárias — definiu-se como diretriz estratégica a extensão da vida útil dos ativos existentes, com foco na mitigação dos riscos associados à obsolescência, à indisponibilidade prolongada e à perda de exatidão metrológica.

O plano apresentado no Quadro 16 foi concebido de forma colaborativa, envolvendo a equipe multidisciplinar descrita na Seção 4.1.2, e estruturado em eixos de atuação diretamente vinculados aos riscos identificados nas FMEAs.

Quadro 16 – Ações prévias para estabelecimento e execução do plano manutenção dos analisadores

EIXO ESTRUTURANTE	PROBLEMA IDENTIFICADO	AÇÕES DEFINIDAS	OBJETIVO TÉCNICO
<p>GESTÃO DE SOBRESSALENTES CRÍTICOS</p>	<p>Ausência de componentes críticos em estoque; elevado prazo de fornecimento (<i>lead time</i>) >90 dias; obsolescência declarada</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Aquisição de canais de medição, placas eletrônicas e componentes críticos • Mapeamento do estoque remanescente junto ao fabricante • Definição de estoque mínimo estratégico • Política de reposição preventiva para itens de desgaste 	<p>Reduzir risco de indisponibilidade prolongada e mitigar impactos da obsolescência</p>
<p>MONITORAMENTO AUTOMATIZADO DE STATUS</p>	<p>Dependência de registros manuais e ausência de rastreabilidade padronizada</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Integração das variáveis de <i>Status Modbus</i> • Desmembramento de registradores binários • Integração ao PIMS e MES • Automatização da apuração de disponibilidade 	<p>Estruturar base objetiva e contínua de monitoramento da confiabilidade</p>
<p>CAPACITAÇÃO OPERACIONAL (LABORATÓRIO)</p>	<p>Falhas simples gerando paradas prolongadas</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Treinamento operacional e mantenedor • Procedimentos de limpeza e desobstrução • Reconhecimento de instabilidade de medição 	<p>Reduzir MTTR e descentralizar intervenções de baixa complexidade</p>
<p>REESTRUTURAÇÃO CONTRATO DE MANUTENÇÃO</p>	<p>Atuação predominantemente corretiva</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Inserção de visitas preventivas periódicas • Definição de escopo técnico anual • Revisão de cláusulas de suporte 	<p>Estruturar manutenção preventiva especializada</p>

Quadro 16 – Plano de Ação para Estruturação da Gestão da Confiabilidade (Continuação)

EIXO ESTRUTURANTE	PROBLEMA IDENTIFICADO	AÇÕES DEFINIDAS	OBJETIVO TÉCNICO
CAPACITAÇÃO TÉCNICA (INSTRUMENTAÇÃO)	Dependência excessiva de suporte externo	<ul style="list-style-type: none"> • Treinamento operacional e mantenedor • Treinamento básico de manutenção • Interpretação inicial de alarmes • Procedimentos de reset e reinicialização 	Aumentar autonomia técnica, diminuir o tempo de resposta e reduzir MTTR.
FORMALIZAÇÃO DA MANUTENÇÃO NO SAP	Inexistência de planos de manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • Definição da estratégia de manutenção • Criação de planos de manutenção • Cadastro de tarefas no SAP • Definição de periodicidades baseadas na FMEA 	Institucionalizar a governança da manutenção
INTERNALIZAÇÃO DA MODELAGEM (OUTOCAL)	<i>Lead time</i> de até 15 dias para criação de modelos	<ul style="list-style-type: none"> • Treinamento no <i>software</i> Outocal • Capacitação para criação e validação de modelos • Internalização parcial da modelagem 	Reduzir <i>lead time</i> para aproximadamente 3 dias
OTIMIZAÇÃO DA ESTRATÉGIA DE CALIBRAÇÃO	Calibração completa demandando ~30 dias	<ul style="list-style-type: none"> • Priorização de fluxos críticos (concentrado grosso e fino) • Coleta intensiva de 12 amostras por dia por 3 dias consecutivos • Variação controlada do percentual de sólidos para avaliar a influência na exatidão 	Acelerar validação das intervenções, reduzir o desperdício com insumos para calibração

Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

4.3.2 Definição da estratégia de manutenção

Com base nos resultados obtidos nas FMEAs, apresentadas nos Quadros 14 e 15, foi possível hierarquizar os modos de falha a partir do NPR e, conseqüentemente, definir estratégias de manutenção coerentes com os princípios da MCC.

A análise dos NPRs evidenciou que os componentes associados aos maiores riscos operacionais são, predominantemente, itens obsoletos, tais como a interface IHM, placas eletrônicas e canais de medição. Esses componentes apresentam elevada severidade devido ao impacto direto na indisponibilidade total ou parcial dos analisadores e à inexistência de substitutos compatíveis no mercado paralelo. Nesses casos, considerando a impossibilidade de ações preventivas eficazes e a limitação tecnológica imposta pela obsolescência, adotou-se como estratégia a manutenção corretiva não planejada, fundamentada na aquisição prévia destes sobressalentes críticos. Essa abordagem, caracterizada pela política de “rodar até a falha”, foi aplicada de forma consciente e controlada, mitigando o risco de longos períodos de indisponibilidade por meio da disponibilidade prévia das peças em estoque.

Paralelamente à definição das estratégias corretivas para os componentes obsoletos, os itens classificados como componentes de desgaste ou consumíveis — tais como as pastilhas de medição do PSI300, atuadores pneumáticos, solenóides e elementos do sistema de refrigeração — foram enquadrados em uma política de manutenção preventiva. Essa estratégia teve como objetivo principal maximizar a disponibilidade operacional e preservar a exatidão dos analisadores, por meio de inspeções, ajustes, limpezas e substituições periódicas.

Para viabilizar a aplicação dessa política, foram elaboradas listas de tarefas detalhadas, contendo o passo a passo das atividades de manutenção a serem executadas em cada um dos analisadores. Essas listas de tarefas serviram de base para a criação dos planos de manutenção no sistema SAP, permitindo que a gestão das periodicidades e os recursos fosse realizada de forma automática. Dessa forma, assegurou-se maior rastreabilidade das intervenções, padronização das atividades e controle efetivo da execução das manutenções preventivas, como pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 – Plano de manutenção preventiva dos analisadores no sistema SAP

The image displays two screenshots of the SAP maintenance planning interface. The top screenshot is for 'MNT-PREV SEMES 02-17LF015 ANALISADOR' and the bottom is for 'MNT-PREV SEMES 02-17LF014 ANALI COURIER'. Both screens show a 'Dados de planejamento' section with the following details:

Centro planej.	Grp.plnj.PM
	INS INSTRUMENTACAO

Tipo de ordem	Tp.ativ.PM
ZPM1 OM Planejada	360 Manutenção regular

CenTrab respon.	Divisão
SINS009 / Instrumentação Metrologi.	

Prioridade	Norma de apropriação
P3 - Rotina	

The 'Lista de tarefas' section at the bottom of each screen shows a single task with the description 'MNT-PREV ANALISADOR PSI 300' and 'MNT-PREV ANALISADOR COURIER 61SL' respectively.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

Adicionalmente, com o objetivo de garantir a uniformidade técnica das intervenções e reduzir a dependência de conhecimento tácito, foram desenvolvidos procedimentos operacionais específicos, incluindo instruções para a troca do fluido de arrefecimento do chiller, verificação do desgaste das pastilhas de medição e análise de alarmes e variáveis de *status* dos analisadores, contribuindo para a antecipação de falhas potenciais e para a redução do tempo de resposta às anomalias.

Como resultado da análise de obsolescência, observou-se ainda uma diferença significativa entre os dois modelos de analisadores avaliados. Enquanto o Metso Courier 6i ainda dispõe de determinados componentes disponíveis em estoques remanescentes do fabricante, o Metso PSI300 apresenta indisponibilidade crítica de sobressalentes essenciais, como o PLC e a IHM. Diante desse cenário, foi evidenciado para a organização a necessidade da atualização tecnológica do analisador PSI300 para a versão PSI 300i, com o objetivo de assegurar a continuidade das medições.

4.4 Avaliação

4.4.1 Resultados do desenvolvimento do plano de manutenção

A partir do desenvolvimento do plano de manutenção, observam-se avanços significativos na sistematização da gestão desses equipamentos. A elaboração das FMEAs contou com a participação de equipe multifuncional, promovendo discussão estruturada sobre funções, modos de falha, causas e consequências. Esse processo contribuiu para o aprofundamento do conhecimento técnico sobre os sistemas, subsistemas e componentes dos analisadores, fortalecendo a autonomia organizacional e reduzindo a dependência exclusiva do fabricante.

Sob a perspectiva qualitativa, a percepção dos operadores indica maior agilidade na atuação frente a alarmes e instabilidades. Esse resultado evidencia fortalecimento da integração entre operação e manutenção, aspecto essencial para a melhoria contínua do desempenho de processos produtivos.

No que se refere aos índices de risco, a reavaliação dos modos de falha após a definição das ações propostas permitiu estimar a redução potencial dos NPR, conforme apresentado nos Quadros 17 e 18. Ressalta-se que tais reduções possuem caráter projetivo, uma vez que parte das ações ainda se encontra em fase de implementação ou consolidação. Assim, os valores recalculados representam o cenário esperado após a implementação integral do plano de manutenção, constituindo uma estimativa técnica fundamentada nos critérios revisados de Severidade, Ocorrência e Detecção.

Quadro 17 – Potencial redução do NPR da FMEA do PSI300

ITEM	COMPONENTE	ANTES				DEPOIS				JUSTIFICATIVA
		S	O	D	NPR	S	O	D	NPR	
1	Pastilha de Medição	6	9	2	108	6	5	2	60	Redução da ocorrência devido a melhoria no sistema de água do analisador.
	Pastilha de Medição	6	8	6	288	6	4	6	144	
2	Sensor LVDT	6	2	4	48	4	1	4	16	Diminuição da ocorrência, devido a implementação das rotinas de manutenção preventiva.
	Sensor LVDT	7	2	2	28	6	2	2	24	
	Sensor LVDT	6	8	6	288	6	4	6	144	
3	PLC	7	1	8	56	6	1	8	48	Redução da severidade devido a construção do estoque de segurança.
	PLC	7	1	10	70	6	1	10	60	
	PLC	10	2	10	200	8	2	10	160	
4	IHM	9	10	7	630	9	8	7	504	Diminuição da ocorrência, devido a implementação das rotinas de manutenção preventiva.
	IHM	9	6	10	540	9	4	10	360	
	IHM	6	3	10	180	6	2	10	120	
	IHM	10	4	10	400	10	3	10	300	
	IHM	7	10	10	700	7	5	10	350	
5	Conversor Modbus	7	1	10	70	6	1	10	60	Redução da severidade devido a construção do estoque de segurança.
	Conversor Modbus	10	4	10	400	8	4	10	320	
6	Atuador Pneumático	4	7	5	140	4	5	5	100	Diminuição da ocorrência, devido a implementação das rotinas de manutenção preventiva.
	Atuador Pneumático	4	6	3	72	4	4	3	48	
7	Solenóide	3	4	9	108	3	2	9	54	Diminuição da ocorrência, devido a implementação das rotinas de manutenção preventiva.
	Solenóide	3	3	6	54	3	1	6	18	

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Quadro 18 - Potencial redução do NPR da FMEA do Courier 6i

ITEM	COMPONENTE	ANTES				DEPOIS				JUSTIFICATIVA
		S	O	D	NPR	S	O	D	NPR	
1	Tubo de Raios-X	8	5	4	160	8	3	4	96	Redução da ocorrência devido a rotina de manutenção do chiller.
	Tubo de Raios-X	8	5	8	320	8	3	8	192	
2	Gerador de Alta Tensão	8	2	5	80	8	1	5	40	Redução da ocorrência devido a manutenção da UPS.
	Gerador de Alta Tensão	8	3	2	48	8	1	2	16	
3	Placas de Controle	10	4	10	400	8	3	10	240	Redução da severidade devido a construção do estoque de segurança. Redução da ocorrência devido a substituição preventiva das baterias, mitigando o risco de vazamento e a causa de novas queimas.
4	Canais de medição	9	6	9	486	7	6	9	378	Redução da severidade devido a construção do estoque de segurança.
	Canais de medição	10	6	9	540	7	4	9	252	Redução da severidade devido a construção do estoque de segurança.
5	IHM	9	7	7	441	7	4	7	196	Redução da severidade devido substituição preventiva por outra com maior capacidade de processamento e memória.
	IHM	9	7	10	630	7	4	10	280	
	IHM	9	7	10	630	7	4	10	280	
	IHM	10	2	10	200	8	1	10	80	
6	Chiller	8	5	5	200	6	3	5	90	Redução da severidade devido a construção do estoque de segurança. Implementação das rotinas de manutenção preventiva.
	Chiller	8	6	4	192	6	4	4	96	
7	Atuador Pneumático	4	7	5	140	4	5	5	100	Diminuição da ocorrência, devido a implementação das rotinas de manutenção preventiva.
	Atuador Pneumático	4	6	3	72	4	4	3	48	
9	Solenóide	3	4	9	108	3	2	9	54	Diminuição da ocorrência, devido a implementação das rotinas de manutenção preventiva.
	Solenóide	3	3	6	54	3	1	6	18	
10	Célula de Medição	3	10	1	30	2	10	1	20	Diminuição da severidade, devido ao treinamento dos laboratoristas na mitigação dessa falha
	Célula de Medição	3	10	1	30	2	10	1	20	

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Além da avaliação dos resultados do desenvolvimento do plano de manutenção, objetivo desta pesquisa-ação, foi possível observar alguns resultados preliminares da implementação parcial do plano de manutenção, da estratégia de calibração e garantia da exatidão metrológica e dos resultados de disponibilidade operacional, os quais são detalhados abaixo.

- **Resultados preliminares da implementação parcial do plano de manutenção**

A partir da estruturação do plano de manutenção, parte das medidas propostas foram implementadas ainda durante o período de desenvolvimento da pesquisa, possibilitando a avaliação preliminar de seus efeitos técnicos, operacionais e organizacionais.

No âmbito da capacitação operacional, foram concluídos os treinamentos direcionados às equipes de laboratório, com ênfase na identificação precoce e mitigação de falhas recorrentes associadas à umidade e obstrução da célula de medição. Tais ocorrências, anteriormente responsáveis por parcela significativa dos chamados corretivos, passaram a ser tratadas diretamente pela equipe operacional, sem necessidade de acionamento da manutenção especializada.

Após a realização dos treinamentos, observou-se a eliminação dos registros relacionados a esses eventos específicos, evidenciando ganho efetivo de autonomia operacional na resolução de falhas de baixa complexidade. Esse resultado contribuiu diretamente para a redução do tempo médio de reparo (*Mean Time To Repair* - MTTR) e para a melhoria da disponibilidade funcional dos analisadores.

No que se refere à calibração e à garantia da exatidão metrológica, o treinamento na utilização do software Metso Outocal possibilitou a internalização da geração de modelos matemáticos de calibração. Como resultado, o tempo médio de desenvolvimento de modelos foi significativamente reduzido, ampliando a autonomia técnica da planta e diminuindo a dependência do fabricante.

A partir dessa capacitação, foram desenvolvidas estratégias baseadas na criação de modelos multifatoriais, nos quais a seleção do modelo matemático passou a considerar o percentual de sólidos da polpa. Dessa forma, tornou-se possível aplicar modelos com melhor coeficiente de correlação estatística conforme a faixa operacional, aumentando a robustez da resposta analítica dos analisadores e reduzindo riscos associados à perda de exatidão — falha funcional crítica sob a ótica da MCC.

Paralelamente, foram elaboradas listas detalhadas de tarefas técnicas para estruturação dos planos de manutenção preventiva, posteriormente cadastradas no sistema SAP, consolidando a formalização da governança de manutenção. A periodicidade inicial foi definida em quatro meses, com previsão de reavaliação após doze meses de execução, à luz do histórico consolidado de falhas e intervenções.

Complementarmente, foi concluída a integração das variáveis de *status* dos analisadores aos sistemas PIMS e MES, viabilizando a apuração automatizada da disponibilidade operacional. Essa implementação consolidou uma base de dados padronizada e rastreável, substituindo registros manuais anteriormente utilizados e elevando o nível de confiabilidade das análises de desempenho.

Em conjunto, essas implementações parciais demonstram a viabilidade prática do plano estruturado, evidenciando ganhos operacionais mensuráveis, fortalecimento da autonomia técnica e consolidação progressiva de um modelo sistematizado de gestão da confiabilidade dos analisadores *on-line*.

Os tópicos a seguir apresentam observações sobre a estratégia de calibração e garantia da exatidão metrológica, bem como resultados de disponibilidade operacional.

- **Estratégia de calibração e garantia da exatidão metrológica**

Considerando que a função principal dos analisadores *on-line* é fornecer medições confiáveis e representativas do processo, a calibração constitui um elemento central da estratégia de MCC. No contexto deste trabalho, a calibração é compreendida como uma tarefa proativa essencial para a prevenção de falhas funcionais associadas à perda de exatidão, as quais não podem ser identificadas exclusivamente por inspeções visuais ou por rotinas convencionais de manutenção preventiva.

O processo de calibração consiste na coleta de amostras padronizadas, geradas automaticamente pelos próprios analisadores durante a operação. Cada amostra recebe um identificador único, é inicialmente analisada pelo equipamento *on-line* e, em seguida, acondicionada em frascos padronizados para posterior análise no laboratório. A partir de um conjunto mínimo de 30 amostras representativas, é realizada, com o auxílio do software Outocal, a construção dos modelos matemáticos de calibração.

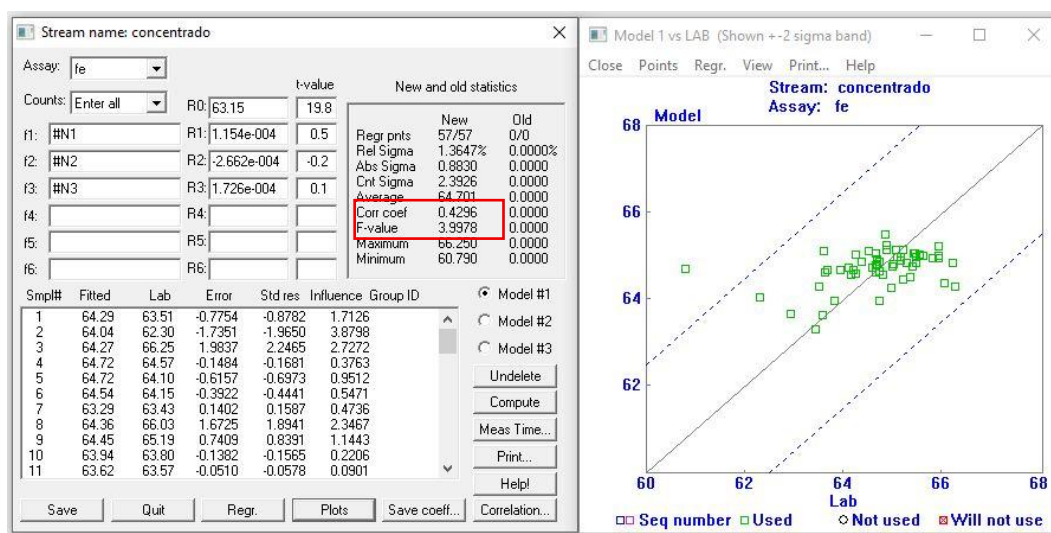
A geração dos modelos de medição apresentados neste trabalho foi realizada com o suporte do software Metso Outocal, versão 2.6.8, ferramenta empregada para estabelecer a correlação estatística entre os resultados fornecidos pelos analisadores *on-*

line e aqueles obtidos nas análises laboratoriais de referência. A partir dessa correlação, foram construídos modelos matemáticos capazes de representar o comportamento do processo, relacionando as respostas instrumentais às variáveis de qualidade monitoradas.

O software é utilizado mediante licença do tipo *hardkey* (*dongle* físico de autenticação), dispositivo conectado à porta USB do computador que habilita a execução do programa e garante o controle de acesso às funcionalidades de modelagem e calibração.

No período compreendido entre 01/06/2025 e 01/07/2025, as amostras destinadas à calibração apresentaram baixo desempenho estatístico, conforme ilustrado na Figura 10. O coeficiente de correlação obtido permaneceu inferior a 70%, valor considerado insatisfatório segundo as recomendações do fabricante para desempenho adequado do sistema de medição. Correlações abaixo desse patamar sinalizam possível degradação funcional dos componentes instrumentais.

Figura 10 – Modelo de calibração com baixa correlação



Fonte: Elaborado pelo autor (2026), no software Outocal.

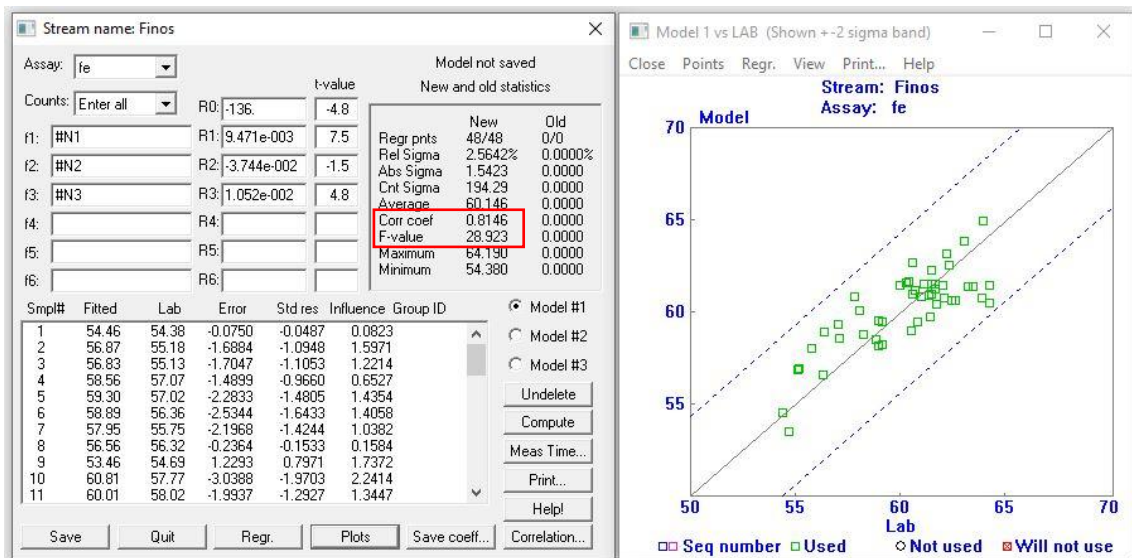
Diante desse resultado, foi conduzida uma análise técnica detalhada do sistema de medição do analisador Courier 6i, por meio da verificação dos parâmetros operacionais, inspeção dos canais de medição e avaliação do comportamento dos ganhos (*GAINS*). Constatou-se que a causa da baixa correlação estava associada à instabilidade dos canais de medição, evidenciada por variações anormais nos sinais espectrais, comprometendo a exatidão das análises químicas.

Em consonância com o plano de ação estruturado, procedeu-se à aquisição de novos canais de medição para o analisador Courier 6i. Por se tratar de componente importado e de fornecimento específico do fabricante, o prazo de entrega foi superior a 120 dias, evidenciando a criticidade logística associada a itens proprietários e parcialmente obsoletos.

Após a chegada e instalação dos novos canais, foi reiniciado o ciclo de calibração no período de 15/01/2026 a 15/02/2026. As amostras coletadas nesse intervalo apresentaram coeficientes de correlação superiores a 70%, conforme ilustrado na Figura 11, indicando recuperação da exatidão analítica e desempenho satisfatório do sistema de medição.

Esse resultado evidenciou a adequada condição dos componentes instrumentais recém-instalados e restabeleceu a confiabilidade dos dados fornecidos pelo analisador ao processo produtivo.

Figura 11 – Modelo de calibração com alta correlação



Fonte: Elaborado pelo autor (2026), no software Outocal.

Esse diagnóstico reforçou a importância da calibração como ferramenta não apenas de ajuste estatístico, mas também como mecanismo indireto de detecção de degradação técnica dos subsistemas de medição.

- **Resultados de disponibilidade operacional**

Durante a fase inicial de diagnóstico, a contabilização das falhas e paradas foi realizada de forma manual, com base em registros operacionais de turno e relatos

inseridos pelas equipes do laboratório. Embora esse método tenha permitido a construção preliminar do histórico de falhas, apresentava limitações relevantes, tais como ausência de padronização, dependência de registros humanos e possibilidade de subnotificação de eventos.

Com a implantação do monitoramento automatizado por meio das variáveis de *status* integradas ao sistema PIMS e ao MES, a disponibilidade passou a ser apurada de forma sistemática, rastreável e padronizada. A lógica adotada baseou-se na transição do sinal binário correspondente ao estado operacional normal do analisador: a mudança do valor 1 para 0 foi interpretada como início de indisponibilidade, enquanto a transição de 0 para 1 caracterizou o retorno à condição operacional.

A disponibilidade operacional mensal foi calculada conforme a Equação (2):

Equação (2) — Disponibilidade Operacional

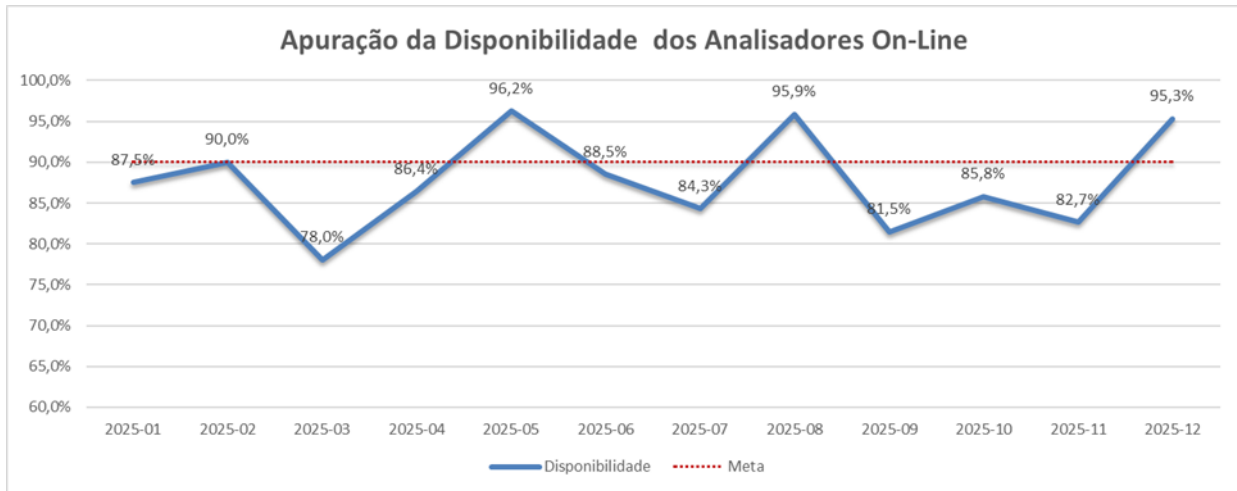
$$Disponibilidade(\%) = \frac{\text{Tempo Total do Período} - \text{Tempo de Indisponibilidade}}{\text{Tempo Total do Período}} \times 100$$

- Tempo Total do Período corresponde ao total de horas do mês analisado;
- Tempo de Indisponibilidade representa o somatório das horas registradas automaticamente como condição de falha ou parada.

No contexto da MCC, a disponibilidade operacional constitui um indicador fundamental da preservação da função do ativo. Considerando que a função principal dos analisadores é fornecer medições contínuas, exatas e disponíveis ao processo, toda falha funcional está diretamente associada à incapacidade do sistema em cumprir sua finalidade operacional.

A Figura 12 apresenta a evolução mensal da disponibilidade operacional ao longo de 2025, considerando a meta estabelecida de 90%. No período de janeiro a abril de 2025, os valores apurados apresentam maior nível de incerteza, uma vez que a indisponibilidade foi contabilizada predominantemente por meio de registros manuais, metodologia sujeita a variações interpretativas.

Figura 12 – Gráfico da disponibilidade apurada mês a mês no ano de 2025



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A partir da consolidação do monitoramento automatizado, os dados passaram a refletir com maior fidelidade o comportamento real dos analisadores, permitindo análise mais consistente das causas estruturais de indisponibilidade.

No mês de junho de 2025, a queda de disponibilidade foi influenciada por falhas recorrentes nos canais de medição do analisador Courier 6i do Concentrador 3, caracterizadas por desarmes e instabilidade associada à variação dos ganhos (*GAINs*). Como ação corretiva imediata, realizou-se a substituição dos canais por unidades disponíveis (usadas) e, paralelamente, formalizou-se a aquisição de novos canais junto ao fabricante. O prazo de fornecimento superior a 120 dias evidenciou a vulnerabilidade do sistema frente à obsolescência e à dependência de sobressalentes proprietários.

Nos meses de setembro, outubro e novembro de 2025, a redução de disponibilidade esteve associada principalmente ao PSI300 do Concentrador 2, que apresentou falhas recorrentes de comunicação decorrentes de travamentos da IHM. Essas ocorrências foram agravadas pela indisponibilidade de sobressalentes compatíveis no mercado, em razão do estágio avançado de obsolescência do equipamento.

Os resultados observados indicam que, embora as ações estruturadas — como aquisição estratégica de sobressalentes, capacitação técnica e monitoramento automatizado — tenham fortalecido a governança técnica e melhorado a capacidade de resposta às falhas, a limitação tecnológica imposta pela obsolescência permanece como fator estruturante de risco operacional.

Sob a ótica da MCC, verifica-se que determinadas falhas não podem ser plenamente mitigadas por tarefas preventivas ou preditivas, configurando cenários nos quais a decisão estratégica de reprojeto ou atualização tecnológica se torna a alternativa mais eficaz para preservação da função do ativo. Nesse contexto, a atualização do PSI300 para versões suportadas pelo fabricante surge como medida estrutural necessária para assegurar a continuidade e a confiabilidade das medições no médio prazo.

Assim, a análise de disponibilidade não apenas evidenciou os impactos das falhas específicas ao longo do período avaliado, mas também consolidou a compreensão de que a gestão da confiabilidade dos analisadores exige combinação equilibrada entre manutenção estruturada, gestão de obsolescência e planejamento estratégico de investimentos tecnológicos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A confiabilidade dos analisadores *on-line* constitui elemento estruturante para o controle eficiente do processo de beneficiamento de minério de ferro, uma vez que a estabilidade operacional da moagem, da classificação e da flotação depende diretamente da qualidade, disponibilidade e exatidão das medições químicas e granulométricas. Nesse contexto, este trabalho partiu da necessidade de estruturar a gestão da confiabilidade dos analisadores Metso Courier 6i e PSI300, reconhecendo sua relevância estratégica para o suporte às decisões operacionais e aos sistemas de automação da planta.

O objetivo geral do estudo foi avaliar os analisadores *on-line* Courier 6i e PSI300, propondo um plano de manutenção que propiciasse o aumento de confiabilidade desses equipamentos. Esse objetivo foi atingido por meio da consolidação de um modelo técnico integrado, que envolveu diagnóstico situacional, levantamento histórico de falhas, análise estruturada de modos de falha, priorização por NPR e definição de estratégias de manutenção alinhadas à criticidade dos componentes.

A aplicação das FMEAs permitiu identificar a elevada criticidade associada a componentes eletrônicos obsoletos, como IHM, placas de controle e canais de medição, direcionando decisões estratégicas fundamentadas em risco. A partir dessa hierarquização, foram definidas políticas diferenciadas de manutenção corretiva estratégica — com formação de estoque de sobressalentes críticos — e manutenção preventiva para componentes de desgaste, assegurando coerência com a lógica decisória da MCC.

Adicionalmente, o estudo possibilitou avanços relevantes na governança técnica dos ativos. A implantação do monitoramento automatizado por variáveis de *status* integradas aos sistemas PIMS e MES eliminou a dependência exclusiva de registros manuais, estabelecendo base objetiva e rastreável para apuração da indisponibilidade operacional. A internalização parcial do processo de calibração, por meio da capacitação no software Outocal, reduziu significativamente o lead time de elaboração de modelos e permitiu a adoção de estratégias mais robustas, como modelos multifatores ajustados ao percentual de sólidos da polpa.

No âmbito operacional, os treinamentos realizados com as equipes de laboratório e instrumentação ampliaram a autonomia técnica e reduziram ocorrências de falhas de baixa complexidade, evidenciando a importância da integração entre operação e

manutenção. Embora parte desses resultados possua natureza qualitativa, os indícios observados apontam fortalecimento da cultura de confiabilidade e maior capacidade de resposta às anomalias.

Do ponto de vista acadêmico e metodológico, o trabalho contribui ao demonstrar a aplicabilidade prática da MCC e da FMEA em sistemas de medição *on-line* no contexto do beneficiamento mineral, integrando conceitos de gestão da manutenção e governança técnica. O modelo estruturado pode ser replicado e adaptado para outros ativos críticos da indústria mineral ou de processos contínuos, ampliando sua relevância além do caso estudado.

Entretanto, o estudo apresenta limitações. Parte das ações propostas no plano de manutenção elaborado encontra-se em fase inicial de implementação, e o período de avaliação ainda não permite mensurar, de forma estatisticamente consolidada, impactos sobre indicadores como MTBF, MTTR e disponibilidade média anual. Além disso, a impossibilidade de atualização tecnológica imediata dos analisadores impõe restrições estruturais que limitam o alcance das melhorias implementadas, especialmente no caso do PSI300, cuja obsolescência demanda decisão estratégica futura.

Como recomendações para trabalhos futuros, sugere-se a consolidação de indicadores de confiabilidade ao longo de ciclo mínimo de doze meses após a plena implementação dos planos de manutenção, a avaliação econômica das estratégias adotadas sob a ótica de custo do ciclo de vida, a integração dos dados de confiabilidade a ferramentas de *Business Intelligence* corporativas e a análise comparativa entre manutenção estratégica de extensão de vida útil e substituição tecnológica.

Conclui-se que a confiabilidade dos analisadores *on-line* não deve ser tratada apenas como atributo técnico isolado, mas como componente fundamental da estabilidade, competitividade e sustentabilidade operacional do processo de beneficiamento mineral. A estruturação sistemática da gestão da confiabilidade, apoiada em critérios técnicos, análise de risco e integração entre equipes, representa passo decisivo para transformar ativos tecnológicos críticos em fontes consistentes de informação confiável para a tomada de decisão industrial.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 16742:2021: Minérios de ferro — Amostragem de polpas. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ANTÓNIO, Nelson Santos; TEIXEIRA, António. Gestão da qualidade: de Deming ao modelo de excelência da EFQM. Lisboa: Edições Sílabo, 2006.

BANDEIRA, Matheus Henrique Cavalcante. Aplicação da metodologia de manutenção centrada em confiabilidade (MCC) em sistema de refrigeração. 2017. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2017.

BATALHA, Mário Otávio. Introdução à engenharia de produção. São Paulo: Livraria Varela, 2007.

BLOOM, Neil. Reliability centered maintenance (RCM): implementation made simple. New York: McGraw-Hill, 2005.

CAROBA, Ádria Danielle Silva. Proposta de uma ferramenta para o controle estatístico aplicado ao processo de laminação de uma indústria siderúrgica. 2020. 63 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

CASTRO, Lucas Araújo. Estudo dos princípios da manutenção centrada na confiabilidade para a elaboração de plano de ação: o caso de uma frota de caminhões rodoviários de uma empresa de mineração. 2020. 68 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

CIERCO, Agliberto Alves; ROCHA, Alexandre Varanda; SOUZA, Edmarson. Gestão da qualidade. Rio de Janeiro: FGV, 2003.

CORRÊA, Fernando Ramos. Gestão da qualidade. São Paulo: [s.n.], 2019.

CORRÊA, William Carlos. Melhoria de performance de equipamentos e máquinas industriais através do controle de estabilidade de processo. 2015. Monografia (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

COSTA, Eliezer Arantes da. Gestão estratégica: da empresa que temos para a empresa que queremos. São Paulo: Saraiva, 2007.

FALCONI, Vicente. TQC: controle da qualidade total no estilo japonês. Nova Lima: Falconi Consultores de Resultado, 2001.

FERREIRA, Janderson da Conceição *et al.* Proposta de um método para priorização de risco em FMEA considerando custo de ocorrência do modo de falha. *Exacta*, São Paulo, v. 15, n. 3, p. 487–499, 2017.

FERREIRA, Paulo Henrique Assis. Estudo das contribuições da manutenção centrada na confiabilidade na implementação do perfil de perdas com auxílio do Business Intelligence. 2021. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

FOGLIATTO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luis Duarte. Confiabilidade e manutenção industrial. Rio de Janeiro: Elsevier; ABEPRO, 2011.

GIL, Antonio Carlos. Métodos e técnicas de pesquisa social. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GONÇALVES, Thaís Cunha. Aplicação da manutenção centrada na confiabilidade para equipamentos de uma empresa do setor de mineração. 2024. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2024.

JURAN, J. M.; GRZYNA, Frank M. Juran's quality control handbook. São Paulo: McGraw-Hill, 1991.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. Fundamentos de metodologia científica. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

LEWIN, Kurt. Action research and minority problems. *Journal of Social Issues*, v. 2, n. 4, p. 34–46, 1946.

LIMA, Maria Érica de Oliveira. Manual de metodologia. Natal: UFRN, 2009.

LOPES, Priscila de Moraes. Controle de vazão para a carga circulante no processo de flotação de grossos. 2023. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023.

LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Silvia Cristina Alves. Tratamento de minérios. Rio de Janeiro: CETEM, 2010.

MARSHALL JUNIOR, Isnard *et al.* Gestão da qualidade e processos. Rio de Janeiro: FGV, 2012.

METSO. Courier 6i analyzer. Disponível em: <https://www.metso.com/>

. Acesso em: 01 nov. 2025.

METSO. Courier 6i and Courier 5i SL slurry analyzers: operating manual. Code 10000005871e, Revision C. [S.l.]: Metso, s.d. Documento interno. Acesso em: 26 fev. 2026.

METSO. PSI 300i analyzer brochure. 2025. Disponível em: <https://www.metso.com/>

. Acesso em: 01 nov. 2025.

MOUBRAY, John. Manutenção centrada em confiabilidade. Lutterworth: Aladon, 2000.

OLIVEIRA, Vinícius Lacerda de. Aplicação da metodologia manutenção centrada em confiabilidade (MCC). 2017. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

PIMENTA, Rui Otoniel R. FMEA: análise dos modos de falha e seus efeitos. São José dos Pinhais: Brazilian Journals, 2022.

PRODANOV, Cleber Cristiano; FREITAS, Ernani Cesar de. Metodologia do trabalho científico. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

RAMOS, Edson Marcos L. S. Controle estatístico da qualidade. São Paulo: Érica, 2016.

REMES, A. *et al.* Effect of speed and accuracy of *on-line* elemental analysis on flotation control performance. Minerals Engineering, v. 20, n. 11, p. 1056–1063, 2007.

RIBEIRO, Haroldo. Você sabe o que é 5S? São Caetano do Sul: PDCA, 2015.

RODRIGUES, Marcus Vinícius. Entendendo, aprendendo e desenvolvendo sistemas de qualidade Seis Sigma. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

SELEME, Robson; STADLER, Humberto. Controle da qualidade: as ferramentas essenciais. Curitiba: IBPEX, 2010.

SIENA, Osmar; BRAGA, Aurineide Alves; OLIVEIRA, Clésia Maria de; CARVALHO, Erasmo Moreira de. Metodologia da pesquisa científica e elementos para elaboração e apresentação de trabalhos acadêmicos. Belo Horizonte: Poisson, 2024.

SILVA, Edna Lúcia da; MENEZES, Estera Muszkat. Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação. 4. ed. Florianópolis: UFSC, 2005.

SILVA, Marcos Rafael. Estudo de confiabilidade aplicado à manutenção de pás-carregadeiras. 2018. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

SMITH, Anthony M.; HINCHCLIFFE, Glenn R. RCM: gateway to world class maintenance. Amsterdam: Elsevier, 2003.

THIOLLENT, Michel. Metodologia da pesquisa-ação. 18. ed. São Paulo: Cortez, 2011.

VIANA, Herbert Ricardo Garcia. PCM: planejamento e controle da manutenção. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

ZANDONADE, Melaine Moreira. Influência da proporção de diamina/monoamina no processo de flotação. 2023. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023.

ZANETTI, Mateus Batista. Aplicação da metodologia FMEA para revisão das estratégias de manutenção. 2019. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

MORAD, Amin Moniri; POURGOL-MOHAMMAD, Mohammad; SATTARVAND, Javad. Application of reliability-centered maintenance for productivity improvement of open pit mining equipment: Case study of Sungun Copper Mine. *Journal of Central South University*, v. 21, n. 6, p. 2372–2382, 2014.

PALEI, Sanjay Kumar; DAS, Smarak; CHATTERJEE, Snehmayoy. Reliability-centered maintenance of rapier dragline for optimizing replacement interval of dragline components. *Mining, Metallurgy & Exploration*, v. 37, n. 4, p. 1121–1136, 2020.