



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA
BAHIA (IFBA), CAMPUS JEQUIÉ**

TÉRCIO LUCCA BRITO ANDRADE

**MÉTODOS PARA ANÁLISE DE MODOS DE FALHAS E AUMENTO DA
CONFIABILIDADE DA MOAGEM EM PLANTAS DE BENEFICIAMENTO DE
MINÉRIOS**

JEQUIÉ

2023



**INSTITUTO
FEDERAL**

Bahia

Campus
Jequié

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA
BAHIA (IFBA), CAMPUS JEQUIÉ**

TÉRCIO LUCCA BRITO ANDRADE

**MÉTODOS PARA ANÁLISE DE MODOS DE FALHAS E AUMENTO DA
CONFIABILIDADE DA MOAGEM EM PLANTAS DE BENEFICIAMENTO DE
MINÉRIOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica, com ênfase em Mecatrônica, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia - Câmpus Jequié, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica, com ênfase em Mecatrônica.

Orientador: Prof. Ms. Fabiano Borges

Coorientador: Prof. Dr. Francisco Regilson

JEQUIÉ

2023

Ficha Catalográfica

Será adicionada posteriormente.

Folha de Aprovação

Será adicionada posteriormente.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer e dedicar este trabalho a minha família, em especial para as minhas mães Aliadne Brito e Leiliadne Brito, e para a minha avó Lucy Muniz, que sempre me apoiaram e encorajaram a perseguir meus sonhos. Sem o amor e suporte de vocês, nada disso seria possível.

À André Siqueira, meu coordenador de estágio, amigo e grande incentivador, por me orientar e guiar ao longo de todo esse processo de aprendizagem.

À Fabiano Borges, meu orientador de estágio e do trabalho de conclusão de curso, por seu tempo, esforço e contribuição para o desenvolvimento desta pesquisa.

À Francisco Regilson, meu coorientador, pelo seu valioso apoio, pela assistência em validações de cálculos e pelos seus ensinamentos sobre estatística e confiabilidade.

Todos vocês têm minha profunda gratidão e admiração.

RESUMO

A garantia de estabilidade no processo de moagem, para mineradoras, surge como fator de extrema criticidade. Desta forma, o estudo da confiabilidade busca fornecer diretrizes, viabilizar análises e traçar perfis de perdas para o surgimento de tratativas que cerquem os principais modos de falha e proporcionem operações estáveis, com redução de paradas corretivas em moinhos, bombas e demais equipamentos necessários a área da moagem. Uma baixa confiabilidade neste setor pode ocasionar falhas operacionais constantes, aumento de custos de manutenção com sobressalentes, serviços e equipamentos, além de sobrecargas de outros setores, perda de produção e diminuição da qualidade final dos produtos, afetando diretamente a competitividade da empresa no mercado. Este trabalho tem como objetivo apresentar um estudo sobre como aumentar a eficiência das moagens em plantas de beneficiamento de minério, adotando como premissa o aumento da sua confiabilidade e a redução da taxa de falhas em função do tempo, para todos os equipamentos classificados como críticos para a produção. Serão discutidas as técnicas utilizadas pela Engenharia de Confiabilidade e metodologias empregadas na visão do Lean Six Sigma, que visam garantir a otimização dos processos. Também serão discutidas as técnicas e metodologias mais adequadas para analisar a confiabilidade para em diferentes cenários. Desta forma, será possível estabelecer conexões entre confiabilidade e modos de falha, bem como levantar as principais problemáticas e recorrências no setor de moagem de uma mineradora. A pesquisa se baseia em indústrias que realizam monitoramento preditivo em tempo real dos ativos e que possui equipe dedicada ao Planejamento, Programação e Controle de Manutenção (PPCM). Espera-se que a implementação dessas medidas contribua para o aumento de produtividade e, conseqüentemente, da competitividade de mercado para mineradoras que adotem os conceitos de Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) ou metodologia Lean Six Sigma. A presente pesquisa pode contribuir para o maior entendimento das equipes de manutenção, no ramo da mineração, a respeito das técnicas e ferramentas disponíveis para garantir produções estáveis e o cumprimento de budgets. Desta forma, se torna possível a gestão dos ativos físicos da moagem, evitando desperdícios de tempo, capital e recursos, além de melhores resultados produtivos ocasionados pela estabilidade e confiança operacional, viabilizadas através do atual estudo focado em manutenção.

Palavras-chave: Manutenção. Metodologia. Produtividade.

ABSTRACT

The guarantee of stability in the grinding process for mining companies emerges as a critically important factor. In this way, the study of reliability seeks to provide guidelines, enable analyses, and establish profiles of losses to facilitate the development of approaches that address the main failure modes and promote stable operations with reduced corrective downtime for mills, pumps, and other equipment required in the grinding area. Low reliability in this sector can lead to constant operational failures, increased maintenance costs for spare parts, services, and equipment, as well as overloads in other areas, production losses, and a decrease in the final product quality, directly affecting the company's competitiveness in the market. This work aims to present a study on how to increase the efficiency of ore beneficiation grinding plants by adopting the premise of increasing their reliability and reducing the failure rate over time for all equipment classified as critical to production. The techniques used by Reliability Engineering and methodologies employed from a Lean Six Sigma perspective, aimed at optimizing processes, will be discussed. Additionally, appropriate techniques and methodologies for analyzing reliability in different scenarios will be explored. This way, it will be possible to establish connections between reliability and failure modes, as well as identify the main issues and recurring problems in the grinding sector of a mining company. The research is based on industries that carry out real-time predictive monitoring of assets and have a dedicated team for Maintenance Planning, Scheduling, and Control (PPCM). It is expected that the implementation of these measures will contribute to increased productivity and, consequently, market competitiveness for mining companies that adopt Reliability-Centered Maintenance (RCM) concepts or Lean Six Sigma methodology. This research can contribute to a better understanding by maintenance teams in the mining industry of the techniques and tools available to ensure stable production and budget compliance. This, in turn, enables the management of physical assets in grinding, avoiding waste of time, capital, and resources, while also leading to improved production results resulting from stability and operational confidence, made possible through the current maintenance-focused study.

Keywords: Maintenance. Methodology. Productivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxo da produtivo da linha primária e secundária.	21
Figura 2 – Fluxo produtivo da linha terciária.	22
Figura 3 – Fluxo operacional da linha de rejeito.	23
Figura 4 – Legenda de símbolos.	24
Figura 5 – Quadro como imagem: Modelo de planilha para registro de paradas da produção.	25
Figura 6 – Exemplo de curva exponencial de decaimento da confiabilidade (R_t).	26
Figura 7 – Modelo de diagrama de Pareto aplicado à equipamentos.	31
Figura 8 – Modelo de diagrama de Pareto aplicado à modos de falha.	31
Figura 9 – Quadro como imagem: Tabela para desenvolvimento do RCM.	34
Figura 10 – Diagrama Jack-Knife.	35
Figura 11 – Quadro como imagem: Classificação do banco de dados.	38
Figura 12 – Quadro como imagem: Remanejamento para a tabela de análise.	39
Figura 13 – Quadro como imagem: Aplicação do FMEA.	39
Figura 14 – Quadro como imagem: Priorização do modos de falha.	40
Figura 15 – Quadro como imagem: Resumo da base de dados bruta para <i>upload</i>	42
Figura 16 – Modelo de visual gráfico utilizado para desenvolvimento do Pareto.	43
Figura 17 – Perfil de perdas para equipamentos.	43
Figura 18 – Perfil de perdas para modos de falha.	44
Figura 19 – Quadro como imagem: Definição dos modos de falha para aplicação do 5 Porquês.	46
Figura 20 – Quadro como imagem: Questionário de 5 porquês - técnico de manutenção.	47
Figura 21 – Quadro como imagem: Questionário de 5 porquês - supervisor de manutenção.	47
Figura 22 – Quadro como imagem: Questionário de 5 porquês - operador de área.	48
Figura 23 – Quadro como imagem: Definição dos modos de falha para aplicação do do RCM.	49
Figura 24 – Quadro como imagem: Aplicação do RCM.	50
Figura 25 – Modelo de visual gráfico utilizado para o desenvolvimento do Jack-Knife.	52
Figura 26 – Gráfico como imagem: Aplicação do Jack-Knife - equipamentos.	53
Figura 27 – Gráfico como imagem: Aplicação do Jack-Knife - causas de falha.	53
Figura 28 – Quadro como imagem: Relações Intermetodológicas.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Modelo de tabela para aplicação do FMEA	28
Tabela 2 – Tabela para classificação de severidade de falha.	29
Tabela 3 – Tabela para classificação de ocorrência de falha.	29
Tabela 4 – Tabela para classificação de detecção de falha.	30
Tabela 5 – Modelo de tabela para aplicação dos 5 porquês.	32

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivo Geral	15
1.2	Objetivos Específicos	15
2	REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1	Planejamento, Programação e Controle de Manutenção (PPCM)	16
2.1.1	Tagueamento e Árvores Hierárquicas de Ativos	16
2.1.2	Planejamento	16
2.1.3	Programação	17
2.1.4	Controle	18
2.2	Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC)	18
2.3	<i>Lean Six Sigma</i>	19
2.4	Indicadores	20
2.4.1	Tempo Médio Entre Falhas	20
2.4.2	Tempo Médio de Reparo	20
2.4.3	Disponibilidade Física	20
2.5	Fluxo da Moagem	21
2.6	Banco de Dados	24
2.7	Confiabilidade em Função do Tempo (R_t)	25
3	METODOLOGIA	27
3.1	Metodologias para Análise de Falhas	28
3.1.1	Métodos Lean Six Sigma	28
3.1.1.1	<i>Failure Mode and Effects Analysis</i> (FMEA)	28
3.1.1.2	Perfil de Perdas	30
3.1.1.3	5 Porquês	32
3.1.2	Métodos Estratégicos de Confiabilidade	33
3.1.2.1	Reliability Centered Maintenance (RCM)	33
3.1.2.2	Diagrama Jack-Knife	35
3.1.2.3	Relações Intermetodológicas	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1	Banco de Dados	37
4.2	<i>Failure Mode and Effects Analysis</i> (FMEA)	37
4.2.1	Classificação do Banco de Dados	38
4.2.2	Remanejamento de Dados	39
4.2.3	Análise e Definição de RPN	39

4.2.4	Priorização dos Modos de Falha.	40
4.2.5	Avaliação do Método	40
4.3	Perfil de Perdas	42
4.3.1	<i>Upload</i> de Dados	42
4.3.2	Desenvolvimento Gráfico	43
4.3.3	Análises e Priorização	43
4.3.4	Avaliação do Método	45
4.4	5 Porquês	46
4.4.1	Tratamento e Classificação dos Dados	46
4.4.2	Definição do Escopo	46
4.4.3	Análises e Questionamentos	47
4.4.4	Avaliação do Método	48
4.5	<i>Reliability Centered Maintenance (RCM)</i>	49
4.5.1	Tratamento e Classificação dos Dados	49
4.5.2	Definição do Escopo	49
4.5.3	Análises e Definições	50
4.5.4	Avaliação do Método	51
4.6	Diagrama Jack-Knife	52
4.6.1	<i>Upload</i> de Dados	52
4.6.2	Desenvolvimento Gráfico	52
4.6.3	Análises de Criticidade	53
4.6.4	Avaliação do Método	54
4.7	Relações Intermetodológicas	55
5	CONCLUSÕES	57
	REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

A moagem é uma etapa crucial do beneficiamento de minério, impactando diretamente no resultado final, sendo equivalente à fragmentação fina de rochas. O beneficiamento, por sua vez, é visto por Minas Jr (2018) como "um conjunto de operações que transforma a rocha extraída na mineração em matéria prima para a indústria". Quanto à confiabilidade, Fogliatto e Ribeiro (2011) afirmam que "está associada à operação bem-sucedida de um produto ou sistema, na ausência de quebras ou falhas". Do ponto de vista da sua importância, pode-se afirmar que é imprescindível, pois atua na otimização dos processos e dos equipamentos, analisa dados para tratativas internas, reduz riscos operacionais e fornece maior estabilidade produtiva. A confiabilidade é, portanto, no ponto de vista da mineração, a capacidade de produzir e operar, com confiança, dentro de um determinado período de tempo. Fogliatto e Ribeiro (2011) reiteram que, para a engenharia, a confiabilidade é expressa de forma quantitativa, em termos de probabilidade.

Sendo assim, este conceito surge como fator determinante para o aumento da eficiência e da disponibilidade dos equipamentos, principalmente para mineradoras que enfrentam a ampla competitividade do mercado, onde empresas investem constantemente em inovações para os métodos preventivos de manutenção, de modo a garantir sobrevivência e a efetividade de resultados. Desta forma, se baseando na visão estratégica da manutenção, Zanetti (2019) aborda que:

“A implementação de maior número estratégias de caráter preventivo como a restauração e substituição preventiva, contribuirá para que o planejamento e controle da manutenção seja mais previsível e organizado, além de aumentar a disponibilidade física do equipamento. Além disso, componentes e modos de falha que sequer tinham estratégia bem definida nos planos de manutenção, passaram a ser conhecidos e monitorados, elevando ainda mais a confiabilidade do processo.” (ZANETTI, 2019)

Nesse sentido, as empresas de mineração estão em constante processo evolutivo, amparando-se em práticas que lhes transmitam segurança e garantias, inclusive utilizando práticas automatizadas para facilitar o desenvolvimento da confiabilidade, onde Jesus e Silva (2022) apontam:

“Na indústria da mineração, a gestão da manutenção tem o papel significativo também, pois age diretamente em ativos que são constantemente “postos à prova” durante suas ações diárias. Isso exige que as indústrias intensifiquem a evolução de metodologias de manutenção, a fim de manter a disponibilidade de suas máquinas e consequentemente gerar uma linha de produção em pleno funcionamento”. (JESUS; SILVA, 2022)

Em relação aos métodos da análise de falha, estes indicarão quais são os pontos que precisam ser atingidos primeiramente, por ordem de prioridade de resolução. Os métodos ora abordados nesta pesquisa são: *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA), Perfil de Perdas, 5 Porquês, *Reliability Centered Maintenance* (RCM) e Diagrama *Jack-Knife*, ambos atribuídos como métodos estratégicos de confiabilidade ou ferramentas da filosofia Lean Six Sigma.

Os métodos foram escolhidos a partir das interpretações realizadas sobre as obras de autores como Ford (2011), Ramos (2020), Augusto (2021), Moubray (1997) e Knights (2004), onde: o FMEA surge por ser valorizado em sua capacidade de prever potenciais falhas nos processos e produtos, permitindo a mitigação ou eliminação dessas falhas antes que elas ocorram. O gráfico de Pareto por ser amplamente utilizado para identificar e priorizar problemas, ajudando a focar os esforços nas áreas que proporcionarão o maior impacto de melhoria. O método dos 5 Porquês por ser uma ferramenta de análise de causa raiz que busca identificar a origem dos problemas, ajudando a solucionar questões profundas nos processos. O RCM por ser excepcional ao priorizar a manutenção de ativos com base na criticidade e no impacto potencial de sua falha nos processos produtivos. E, por fim, o diagrama *Jack-Knife* por identificar pontos atípicos e classificá-los quanto ao seu impacto produtivo, se baseando em análises de dispersão logarítmica.

Para estabelecer essa conexão entre moagem e métodos de análises de falhas é necessário debruçar-se sobre estudos teóricos capazes de fornecer subsídios que fundamentam essa relação. Daí a adoção da pesquisa bibliográfica como suporte para as referências. E, Gil (2009), enfatiza que “qualquer que seja a pesquisa, a necessidade de consultar material publicado é imperativa”. Compreendendo o funcionamento da moagem, é possível aplicar os métodos de análise de falhas abordados pela engenharia de confiabilidade e mitigar falhas, tornando-a estável, eficiente e com maior valor agregado. Sem a moagem, há a interrupção do processo de beneficiamento de minerais, devido a dificuldade em se realizar tratamentos químicos em grãos de elevada granulometria.

É válido ressaltar que o processo de cominuição de minérios, tem-se basicamente dois eventos: Britagem e Moagem. Neste caso, a moagem se faz objeto de estudo, entendendo moagem como o processo de fragmentação e redução granulométrica de rochas, secundário a britagem.

Ademais, a confiabilidade surge apontando a probabilidade da certeza do quanto algo pode dar certo, sendo inversamente proporcional à taxa de falhas, e utilizada no processo de melhoria contínua da manutenção. É a capacidade de se estimar o período de bom funcionamento para um determinado ativo. Representa, de forma numérica, a forma de tratar os dados que melhoram o ciclo da manutenção, baseando-se na ferramenta de PDCA (planejar, dirigir, controlar e agir). Com essa ideia de ciclo, primeiro se planeja as ações, depois se dirige o desenvolvimento, após controla-se o processo e, por fim, age-se antecipando os problemas. Assim, a análise da confiabilidade é o caminho que toda empresa que objetiva o sucesso nos negócios deve realizar.

Sendo assim, a presente pesquisa terá como foco apresentar um estudo sobre como garantir a estabilidade de um setor de moagem, utilizando a confiabilidade e métodos de análise e priorização de falhas como vetor de estudo, portanto intitula-se como “Métodos para Análise de Modos de Falhas e Aumento da Confiabilidade da Moagem em Plantas de Beneficiamento de Minérios”, viabilizando o aprofundamento teórico.

1.1 Objetivo Geral

Deste modo, o objetivo da pesquisa é: investigar métodos para aumentar a confiabilidade da moagem em plantas de beneficiamento de minérios, com foco na estabilidade operacional e na priorização de falhas.

1.2 Objetivos Específicos

1. Realizar revisão da literatura sobre confiabilidade e seus métodos de análise de falhas, com ênfase na aplicação desses métodos na indústria de mineração;
2. Explicar o processo de moagem de minérios, bem como o detalhamento de suas partes;
3. Contribuir para o conhecimento teórico e prático da aplicação da confiabilidade na indústria de mineração, fornecendo subsídios para aprimorar os processos de manutenção e produção.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Planejamento, Programação e Controle de Manutenção (PPCM)

O setor de Planejamento, Programação e Controle de Manutenção (PPCM), atualmente, é tido como o pilar da manutenção moderna e, por isso, terá suas partes abordadas nos tópicos seguintes, com a finalidade de contextualizar o leitor com a fundamentação necessária para absorção dos conceitos da função manter.

2.1.1 Tagueamento e Árvores Hierárquicas de Ativos

De acordo com Favarin (2018), "o tagueamento tem o objetivo de mapear a unidade fabril, desde equipamentos a processos possibilitando ganho de tempo quando as manutenções tiverem de ser realizadas.". Deste modo, é possível afirmar que a adoção da prática de identificar os dispositivos agrega valor organizacional para a indústria, permitindo o melhor gerenciamento dos ativos através de suas respectivas classificações. Segundo o site Engenharia 360 (2017), a implementação do tagueamento é a base para a gestão das máquinas e equipamentos, garantindo maior acurácia no controle das atividades demandadas por um ativo. Sendo assim, se torna incoerente iniciar a gestão da confiabilidade de uma planta, ou área, sem o uso desta ferramenta básica de manutenção - ou qualquer outra metodologia similar.

Segundo Viana (2002), "Cada vez mais torna-se necessária tal localização, devido à necessidade dos controles setorizados, bem como à atuação organizada da manutenção.". Deste modo, para se iniciar o gerenciamento da manutenção, é fundamental a devida identificação de cada um dos dispositivos pertencentes a linha produtiva em questão. Sem a adoção desse método, realizar o controle dos ativos se torna uma tarefa árdua, impedindo a aplicação das mais comuns metodologias de análise - conforme será descrito nos próximos subtópicos. O entendimento de confiabilidade, por sua vez, perpassa e depende de todos os processos intrínsecos à gestão da manutenção, demandando o melhor funcionamento possível do setor de Planejamento, Programação e Controle de Manutenção (PPCM). Deste modo, é sensata a implementação de árvores hierárquicas de ativos em unidades fabris durante o seu controle inicial, buscando mapear todos os equipamentos - e processos - com classificações em função da planta, da área, da sub-área, do sistema, do ativo, do conjunto, subconjunto e dos seus componentes, conforme descrito pela Engteles (2022).

2.1.2 Planejamento

De acordo com Fabro (2003), "o planejamento é talvez o mais importante influenciador da excelência de um processo de manutenção". Segundo o mesmo autor, até mesmo a forma de se realizar a manutenção nos equipamentos varia de acordo com a função planejamento. Desta

forma, é possível identificar a criticidade intrínseca ao ato de se realizar um bom planejamento de manutenção, bem como sua relação proporcional com o cumprimento da estratégia definida. É válido ressaltar que, para os atuais modelos de manutenção, a ação de planejar é vista como o alicerce para uma boa execução e condição básica necessária para a estimativa de custos, mão de obra e provisionamento dos recursos que serão direcionados para as equipes de campo.

Em seu estudo, Martins (2023) abre discussão sobre a função planejamento e destaca suas principais atribuições:

"Detalhamento do serviço, onde são definidas as principais atividades, recursos e prazo estimado; micro detalhamento, especificando maquinários, equipamentos, dispositivos e demais recursos que possam impactar o caminho crítico do projeto; orçamentação, com os custos associados aos serviços; e a facilitação dos serviços, fornecendo instruções claras e de fácil compreensão ao executante, como as ferramentas necessárias, aspectos de segurança, dados sobre o equipamento e recomendações gerais". (MARTINS, 2023)

Como abordado, um bom planejamento deve fornecer instruções de fácil compreensão, permitindo a padronização das atividades, sem variar a qualidade das entregas com a mudança da equipe executora. Além disso, todos os recursos micro detalhados devem ser devidamente provisionados para que a etapa seguinte, de programação da manutenção, possa ocorrer. Evitando surpresas com os recursos necessários para as atividades, sejam eles de mão de obra, custos, ferramentas ou maquinários.

2.1.3 Programação

Segundo Zuza (2022), a programação "é o estágio posterior ao trabalho do planejamento, ou seja, todas as demandas necessárias para a realização da atividade já foram previstas, e agora, há a necessidade de disponibilizá-las em uma linha do tempo que seja harmoniosa". O autor complementa definindo a principal atribuição definida para a função programação, afirmando que "se faz necessário prover todos os recursos solicitados pelo planejamento, de tal forma que, eles coincidam em espaço/tempo para que a execução da atividade possa ocorrer de maneira plena e fidedigna ao previsto".

Desta forma, é papel do programador de manutenção definir o período de execução das atividades planejadas e garantir com que os recursos necessários para a execução sejam corretamente direcionadas para as equipes de campo. Adicionalmente, o planejador é o responsável por fazer a interface entre as equipes de operação e manutenção, negociando os momentos mais oportunos de parada de área com o setor de Planejamento e Controle de Produção (PCP).

2.1.4 Controle

De acordo com Souza (2012), "o controle envolve a avaliação de resultados operacionais, continuada da ação remediadora quando os resultados desviam do plano. A atividade de controle é necessária para manter o negócio na direção certa e assegurar que os planos sejam contínuos". O autor complementa que o controle contribui para as tomadas de decisão, desde que esteja disposto de informações claras e corretas. Desta forma, a função controle possui a atribuição de acompanhar indicadores, seja ele de custo, de disponibilidade ou, até mesmo, da confiabilidade de uma determinada planta, fazendo com que os gestores da manutenção passem a visualizar, nas formas quantitativas e qualitativas, os cenários globais e individuais do setor.

Por fim, o controlador de manutenção surge como um dos principais responsáveis pelo ciclo de melhoria contínua, monitorando e, literalmente, controlando todos os parâmetros presentes na função manter. Como indica Souza (2012), a modificação de planos - ou estratégias - podem partir das identificações e análises geradas através dos indicadores monitorados pelo controle de manutenção, retroalimentando as funções planejar e programar.

2.2 Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC)

A Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC), do inglês *Reliability Centered Maintenance* (RCM), é, segundo Fogliato e Ribeiro (2011), "um programa que reúne várias técnicas de engenharia para assegurar que os equipamentos de uma planta fabril continuarão realizando as funções especificadas". O autor complementa afirmando que a metodologia contribui diretamente para o aumento da disponibilidade física e na redução de custos relacionados aos ativos físicos de uma determinada planta.

Ao discutirem sobre os pilares da eficácia da metodologia da Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC), Fogliato e Ribeiro (2011), afirmam que:

"A eficácia da MCC está baseada em alguns pilares próprios desse programa. Entre esses pilares, podem ser destacados: (i) amplo envolvimento de engenheiros, operadores e técnicos de manutenção, caracterizando um ambiente de engenharia simultânea; (ii) ênfase no estudo das consequências das falhas, que direcionam todas as tarefas de manutenção; (iii) abrangência das análises, que consideram questões associadas à segurança, meio ambiente, operação e custos; (iv) ênfase nas atividades pró-ativas, envolvendo tarefas preditivas e preventivas; (v) combate às falhas escondidas, que reduzem a confiabilidade do sistema". (FOGLIATO; RIBEIRO, 2011)

O MCC pode ser definido como um conjunto de metodologias de análise. A existência deste conceito possibilita a aplicação de diversas técnicas para análise de modos de falhas, desenvolvimento de perfis de perda e priorização de atividades.

A metodologia de MCC surge, em paralelo com a engenharia de confiabilidade, para garantir que os ativos físicos de um setor produtivo entreguem maior estabilidade, através da redução de falhas inesperadas e constantes. Sendo assim, é abordado como um dos pilares da melhoria contínua da manutenção, juntamente com a função controle, retroalimentando planos de manutenção, visões de criticidade e reduzindo desperdícios que, antes da aplicação da metodologia, não seriam passíveis de identificação.

Ainda sobre os conceitos teóricos de Fogliato e Ribeiro (2011), a Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) deve se preocupar em como os equipamentos podem falhar e, com isso, identificar as causas de cada falha funcional. Adicionalmente, deve se preocupar com os efeitos de cada modo de falha, ou seja, o que acontece quando cada falha ocorre. Com isso, deve desenvolver alternativas que forneçam à manutenção técnicas que previnam ou mitiguem tais modos de falhas, ou que, em caso de incidência, adotem as melhores ações para tratativa dos seus efeitos.

2.3 *Lean Six Sigma*

De acordo com Junior (2022), a metodologia do *Lean Six Sigma* é uma junção dos pontos fortes da filosofia *Lean* com as ferramentas de gestão do *Six Sigma*. Segundo o mesmo autor, o *Lean* visa a eliminação dos excessos e desperdícios e, o *Six Sigma* a disposição de ferramentas para análise de dados, controle estatístico e controle de qualidade. Deste modo, para a presente aplicação, esta metodologia aborda a redução de desperdícios através do tratamento estatístico dos dados da manutenção.

Esta metodologia, por sua vez, se baseia em um conceito para o alcance da melhoria contínua, o DMAIC (*Define, Measure, Analyze, Improve, Control*, em inglês), que pode ser traduzido para o português como o processo de "definir, medir, analisar, melhorar e controlar". Desta forma, a metodologia do *Lean Six Sigma*, quando direcionada para a manutenção através de projetos, oferece a possibilidade de analisar modos de falhas estatisticamente, priorizar tratativas, reduzir excessos em serviços, mão de obra e recursos, além de cercar eventos que possam causar impacto na confiabilidade da área e, conseqüentemente, reduzir a estabilidade produtiva em moagens.

Embora conceitualmente muito similar aos conceitos de Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC), possui abordagens e técnicas particulares, principalmente na condução de análises estatísticas, onde defeitos visam ser reduzidos. Adicionalmente, Junior (2022) afirma que, "sendo um sistema de aperfeiçoamento, por intermédio da eliminação de erros/defeitos, introduz a organização a uma cultura de excelência operacional", o que diferencia diretamente o *Lean Six Sigma* da metodologia de Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC).

2.4 Indicadores

Segundo Viana (2002), os indicadores representam formas de acompanhar os desafios e a rotina da manutenção. Desta forma, descrevem, quantitativamente, o cenário das equipes de manutenção, sejam relacionados ao planejamento, programação, controle ou, até mesmo, da execução de manutenção. De acordo com o mesmo autor, a definição dos indicadores a serem acompanhados parte da equipe de PPCM, já que, na prática, alguns indicadores se aplicam satisfatoriamente para algumas empresas e não para outras, o que sugere a necessidade de análises de caso. Como parte da fundamentação teórica, os indicadores abordados nas seções a seguir, foram identificados como cruciais para a contextualização com os temas abordados nos capítulos subsequentes.

2.4.1 Tempo Médio Entre Falhas

De acordo com Viana (2002), o Tempo Médio Entre Falhas, ou ainda, *Mean Time Between Failures (MTBF)*, pode ser obtido pela razão do número de horas disponíveis para operação (H_D) pelo número de intervenções corretivas (n), sendo expresso pela equação a seguir:

$$MTBF = \frac{H_D}{n} \quad (2.1)$$

2.4.2 Tempo Médio de Reparo

O Tempo Médio de Reparo, ou ainda, *Mean Time To Repair (MTTR)*, pode ser descrito, de acordo com Viana (2002), como a razão do somatório das horas de indisponibilidade (H_I) para operação pelo número de intervenções corretivas (n), conforme a seguinte equação:

$$MTTR = \frac{H_I}{n} \quad (2.2)$$

2.4.3 Disponibilidade Física

A Disponibilidade Física (DF), por sua vez, é descrita por Viana (2002) como um percentual, sendo equivalente a razão das horas disponíveis para operação (H_D) pelas horas totais do período (H_C), conforme calendário. Sendo expressa pela equação a seguir:

$$DF = \frac{H_D}{H_C} * 100 \quad (2.3)$$

De acordo com a NBR 5462 (1994), disponibilidade é "capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade", desta forma, segundo a mesma fonte referencial, exprime uma medida de desempenho, seja para área, setores ou equipamentos.

2.5 Fluxo da Moagem

O processo adotado como base no presente estudo envolve a moagem à úmido que, segundo Figueira et al. (2010), é a forma mais comum de trabalho para moinhos cilíndricos de bolas. E, como afirmam Luz e Lins (2018), a maioria dos minérios encontrados na crosta terrestre necessitam de algum beneficiamento para melhoria de suas propriedades. Segundo os mesmos autores para a separação seletiva de algum mineral interno a um minério é necessário o conhecimento da granulometria de liberação física deste mineral em relação ao material estéril. Deste modo, o minério deve ser submetido a processos de fragmentação de grãos, como britagem e moagem, até que atinja a granulometria de liberação especificada pelos estudos mineralógicos referentes ao minério. Desde modo, para o caso abordado, o material advindo da britagem é adicionado ao moinho primário, juntamente com água e material recirculado, e moído de forma a gerar uma polpa. Esta polpa, por sua vez, é armazenada em um tanque e, posteriormente, submetida ao primeiro processo de hidrociclonação que, segundo Sampaio et al. (2007a), resulta em dois produtos, o *underflow* e o *overflow*. O autor complementa que "o primeiro contém a maior parte das partículas grossas que foram alimentadas e o segundo engloba a maioria das partículas finas, que foram classificadas". Sendo assim, o material proveniente do *underflow* é recirculado no moinho primário para que consiga alcançar a granulometria especificada e, o material proveniente do *overflow*, é direcionado para o processamento seguinte.

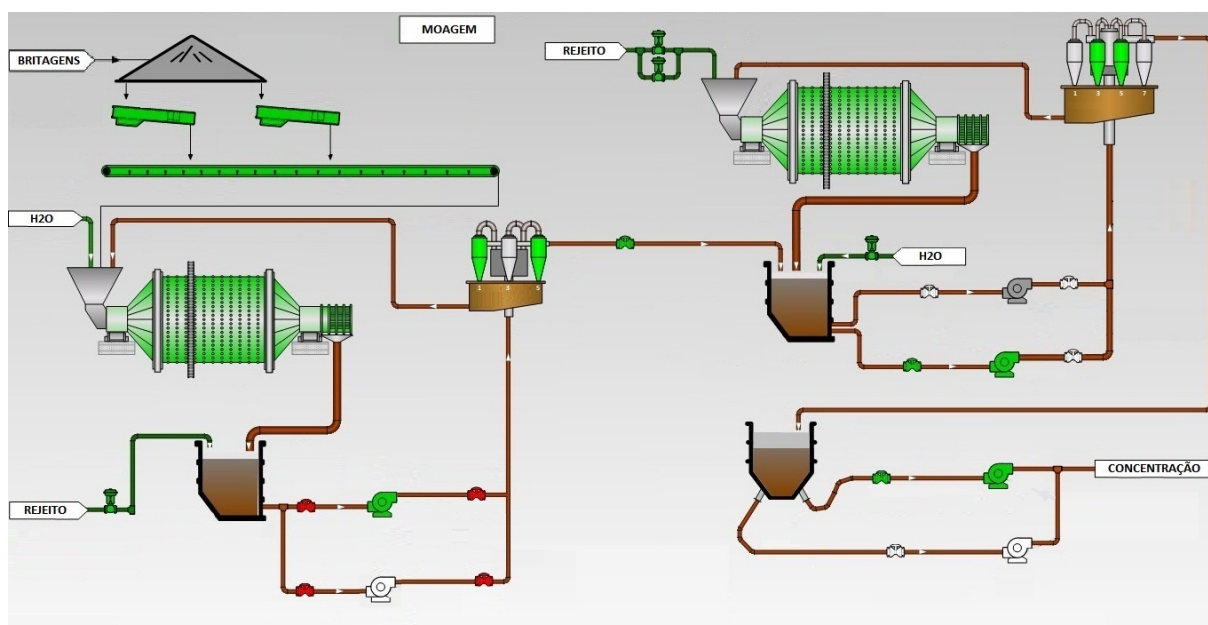


Figura 1 – Fluxo da produção da linha primária e secundária.

Fonte: Autoria própria (2023).

O setor de moagem abordado nesta pesquisa possui quatro linhas de processamento. A linha primária segue o fluxo supracitado, contendo o moinho primário, tanque de armazenamento, hidrociclone e componentes de suporte como: bombas de polpa, bombas de água, sensores de monitoramento, válvulas pneumáticas, tubulações e todo o aparato elétrico necessário para

o funcionamento e acompanhamento dos maquinários. A linha secundária, por sua vez, é alimentada em seu primeiro tanque de armazenamento com o material proveniente do *overflow* do hidrociclone da linha primária. Logo após, esse material é direcionado para alimentação do segundo hidrociclone, fazendo com que o *underflow* siga para o moinho secundário e o *overflow*, de granulometria desejada, siga para o segundo tanque de armazenamento. Deste modo, a linha secundária adota uma certa simetria de componentes com a linha primária, embora não sejam idênticas. Isso inclui, por exemplo, a similaridade de modelo entre os moinhos e se contrapõe com o acréscimo de um tanque de armazenamento na linha secundária e a diferença entre os equipamentos de suporte, como bombas de polpa, bombas de água e válvulas pneumáticas.

A concentração é a terceira linha de processamento, do setor da moagem analisado. Nesta etapa, a polpa é bombeada para os separadores magnéticos de tambor de baixa intensidade e via úmida, permitindo a separação do material em duas classes: rejeito e concentrado. Segundo Sampaio (2007b), "As partículas magnéticas aderem ao tambor rotativo, no qual se encontra instalado o ímã, que pode ser permanente ou eletroímã. As partículas magnéticas são descartadas do circuito como produto magnético". Sendo assim, o rejeito é direcionado para a quarta linha de processamento e o concentrado é destinado, via separadores magnéticos, para o filtro de correia horizontal a vácuo que, conforme França e Casqueira (2007), "trata-se de um transportador de correia com projeto especial, de modo a servir de suporte para uma tela colocada sobre a correia e a permitir o escoamento do ar através da torta". Este mesmo autor também comenta que a aplicação de uma pressão menor que a atmosférica na polpa, promove o aumento da velocidade de formação da torta de filtragem, que nada mais é do que o concentrado em sua fase sólida, após a separação sólido-líquido.

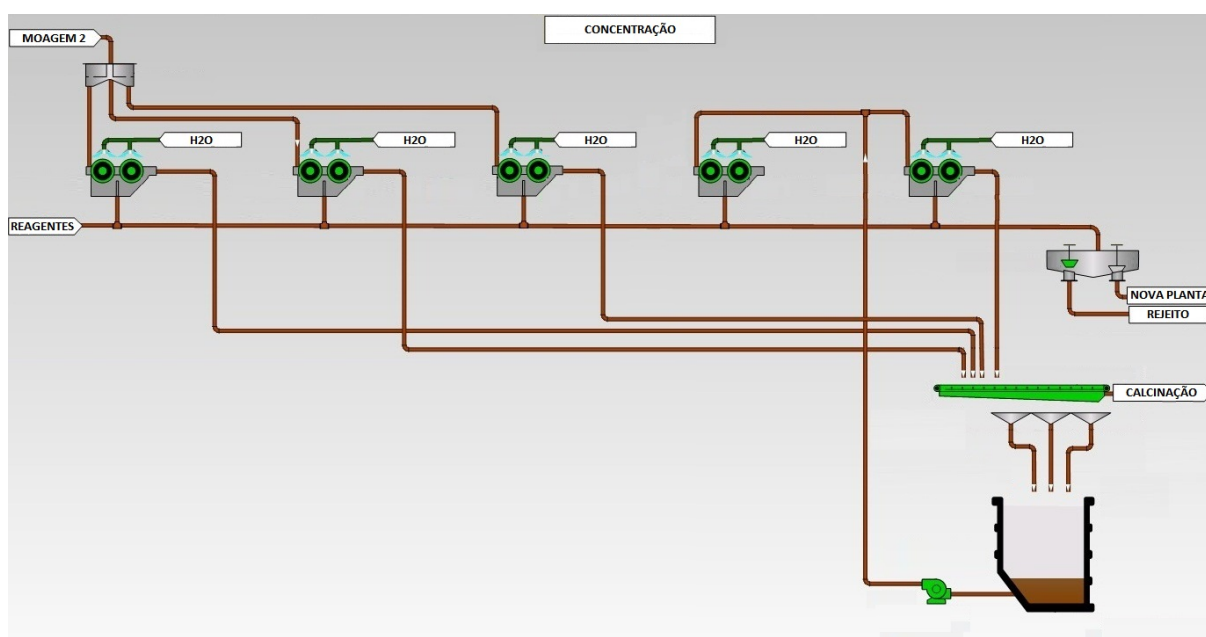


Figura 2 – Fluxo produtivo da linha terciária.

Fonte: Autoria própria (2023).

A quarta linha de processamento, referente aos rejeitos advindos do filtro e dos separadores magnéticos, opera em paralelo com as demais linhas da moagem. Nesse segmento, o líquido filtrado é bombeado para um espessador contínuo convencional que, segundo França e Massarani (2002), "consiste em um tanque provido de um sistema de alimentação de suspensão e um de retirada do espessado (raspadores), dispositivos para descarga do *overflow* e do *underflow*". Nesta etapa, o material do *underflow* é recirculado para a linha de concentração, de modo a potencializar o beneficiamento, e o *overflow* direcionado para as bacias de rejeito não-magnético ou recirculado no próprio espessador.

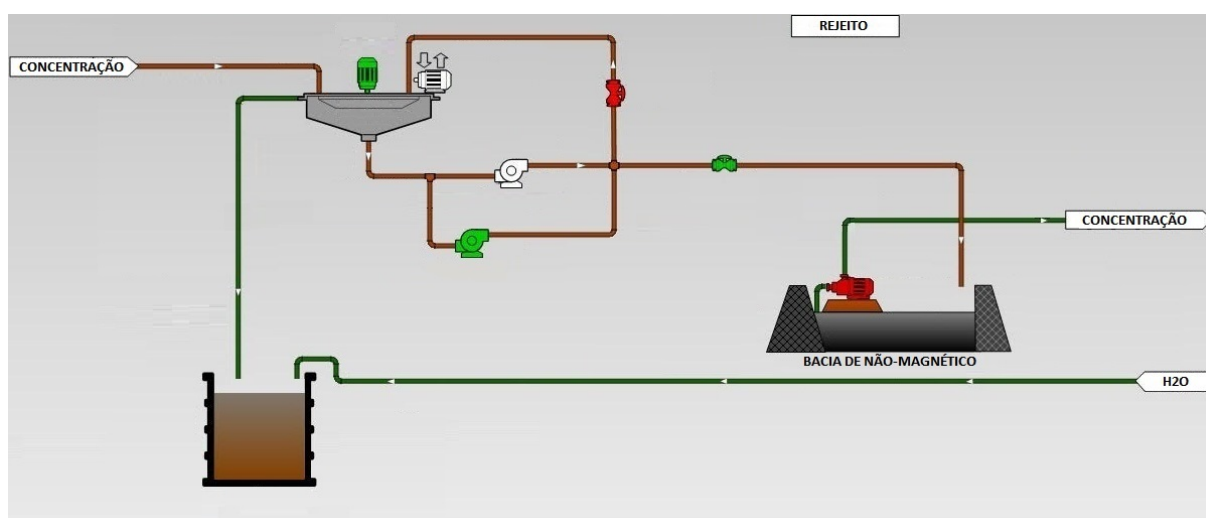


Figura 3 – Fluxo operacional da linha de rejeito.

Fonte: Autoria própria (2023).

É válido ressaltar que o tratamento e bom armazenamento do rejeito é de extrema importância no âmbito da preservação do meio ambiente e na garantia da segurança operacional. O correto gerenciamento dos rejeitos minimiza os impactos negativos na natureza, evitando a contaminação do solo e da água. Desta forma, é importante estabelecer um plano de contingência para lidar com situações de emergência, como vazamentos ou transbordamentos. Esse plano deve envolver a capacitação das equipes responsáveis, a definição de procedimentos e a disponibilidade de recursos. No entanto, esse tema não será incluso no campo das discussões deste estudo e, sugere-se, para estudos futuros, o maior aprofundamento nas discussões acerca do correto tratamento e armazenamento do rejeito advindo de moagens.

Por fim, o material concentrado, após passar pelo processo de filtragem, é destinado para a formação da "pilha feijão", sendo esta uma reserva de material que será responsável por alimentar o próximo setor de beneficiamento de minério na empresa em questão, o forno calcinador.

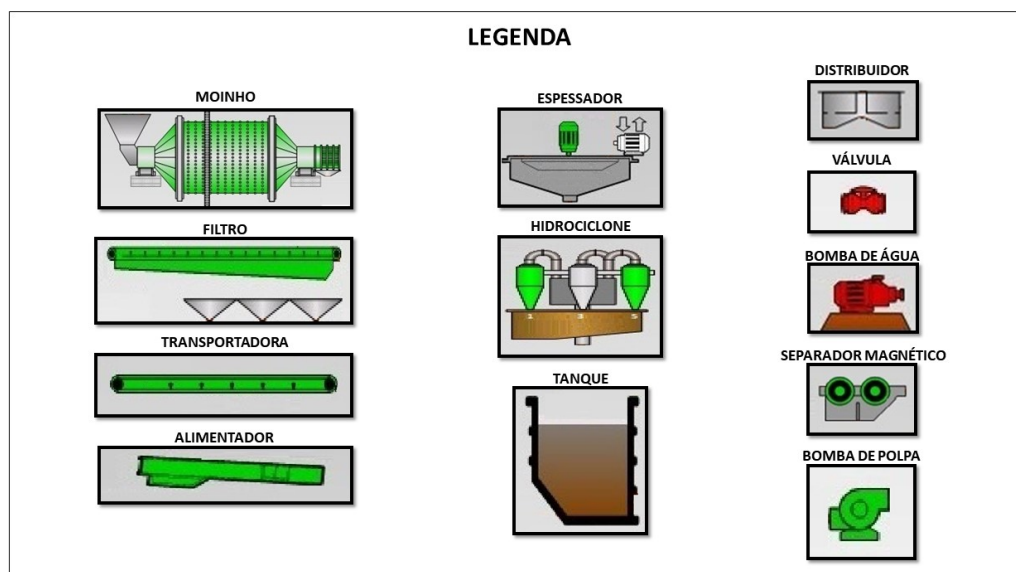


Figura 4 – Legenda de símbolos.

Fonte: Autoria própria (2023).

2.6 Banco de Dados

A mineradora analisada nesta pesquisa, para a aplicação de metodologias de análise de falhas, realiza a alimentação de um banco de dados, para todos os eventos operacionais e de manutenção, contendo as informações dispostas na "Figura 5", de forma a permitir posteriores métricas, em função do tempo, dos dados armazenados para todas as interrupções nas linhas de processamento da moagem. Segundo Suzano (2020), "o sucesso de diversas indústrias é função da precisão das informações coletadas, tendo como base uma tipologia das paradas". Desde modo, é possível compreender o grau de importância atribuído para o processo de registro e coleta de dados. Como condição de contorno para o presente estudo, está o monitoramento em tempo real, atrelado ao procedimento de registro de todas as paradas produtivas, sejam elas programadas ou não-programadas.

As informações são anexadas na planilha "Paradas da Produção" e tangenciam todos os equipamentos da planta de beneficiamento, incluindo a moagem e suas linhas de processamento. Deste modo, o uso da planilha, para armazenamento, coleta e análise de informações, se restringe estritamente ao banco de dados contido em função do tempo, sendo dividido em períodos mensais. Sendo assim, as informações são levantadas e processadas, conforme será abordado nos seguintes capítulos, onde serão evidenciados e discutidos tanto os métodos utilizados, quanto os resultados provenientes das tratativas.

É válido considerar que, nem todas as atividades realizadas pelo setor de manutenção resultam na parada produtiva da área. Isso ocorre quando o equipamento em falha não atua como componente alta criticidade na linha de produção, seja pela possibilidade de realizar *bypass* no equipamento com o uso de reserva, pelo fato do equipamento ter apenas a funcionalidade de suportar os ativos críticos ou quando este não afeta diretamente as áreas de meio ambiente

e saúde ocupacional. Deste modo, para cercar todas as atividades que não são incluídas na planilha de "Paradas da Produção", é necessário o uso de um sistema de gestão exclusivo para manutenção. Esse sistema estará encarregado de registrar todas as atividades atribuídas a manutenção, independente do fato de parar ou não o setor produtivo. No entanto, para fins de estudo no presente artigo, apenas as paradas que afetem a produção, lançadas por parte da operação, serão consideradas, conforme supracitado.

Dia	Área	Início	Término	Horas paradas	Minutos	Letra	Área debitada	Equipamento	Causa	Observações
6	Moagem_1	19:00	20:23	01:23	83	A	Elétrica	350-MN-002A	Disjuntor desligado	rea parada por defeito por bloqueio pelo recostato.
6	Moagem_2	19:00	23:59	04:59	299	A	Mecânica	350-MN-002B	Corrente Alta	rea parada devido corrente alta no motor auxiliar do moinho 02.
7	Moagem_2	00:00	07:00	07:00	420	A	Elétrica	350-MN-002B	Queimado	Queimar do motor auxiliar MO-102 M1.
7	Moagem_2	07:00	12:18	05:18	318	D	Elétrica	350-MO-102	Queimado	Queimar do motor auxiliar MO-102 M1.
7	Moagem_1	19:24	22:12	02:48	168	A	Mecânica	350-BA-019	Quebrado	área parada devido quebra do acoplamento da 350 BA-19.
7	Moagem_2	19:24	22:12	02:48	168	A	Mecânica	350-BA-019	Quebrado	área parada devido quebra do acoplamento da 350 BA-19.
7	Moagem_2	22:12	23:10	00:58	58	A	Mecânica	350-MN-002B	Quebrado	área permaneceu parada devido acoplamento do 350 MO-102-M1 ter soltado.
8	Moagem_1	13:36	15:29	01:53	113	B	Mecânica	370-FI-001-M1	Reposição	Reposição do parafuso da base de alinhamento do filtro.
8	Moagem_2	13:36	15:29	01:53	113	B	Mecânica	350-MO-101	Reposição	Reposição do parafuso da base de alinhamento do filtro.
9	Moagem_1	05:30	07:00	01:30	90	D	Elétrica	350-MN-002A	Sem energia	parada devido queda de energia.
9	Moagem_2	05:30	07:00	01:30	90	D	Elétrica	350-MN-002B	Sem energia	parada devido queda de energia.
9	Moagem_2	07:00	09:46	02:46	166	B	Mecânica	350-MO-102	Quebrado	Parada devido parafusos do acoplamento do motor auxiliar do MO-101 danificado.
9	Moagem_1	19:03	19:23	00:20	20	D	Produção	350-AL-002B-M	Obstrução	parada devido rocha travada no chute do AL-02 B.
9	Moagem_2	19:03	19:23	00:20	20	D	Produção	350-AL-002B-M	Obstrução	parada devido rocha travada no chute do AL-02 B.
10	Moagem_1	02:28	02:35	00:07	7	D	Mecânica	350-BP-001B-M	Vazamento	parada para inversão da BP-01 B para BP-01 A devido vazamento grande na voluta.
10	Moagem_2	02:28	02:35	00:07	7	D	Mecânica	350-BP-001B-M	Vazamento	parada para inversão da BP-01 B para BP-01 A devido vazamento grande na voluta.
10	Moagem_1	12:41	14:47	02:06	126	C	Elétrica	350-BP-010-M	Falha de equip.	Queima dos cabos na caixa de ligação da BP-010.
10	Moagem_2	12:41	14:47	02:06	126	C	Elétrica	350-BP-010-M	Falha de equip.	Queima dos cabos na caixa de ligação da BP-010.
10	Moagem_2	14:47	19:00	04:13	253	C	Mecânica	350-MO-102	Reposição	Reposição de parafusos no acoplamento do motor auxiliar, 350-MO102.
10	Moagem_2	19:00	23:59	04:59	299	B	Mecânica	350-MO-102	Reposição	Repor parafusos no acoplamento do 350-MO102, motor auxiliar do moinho.
10	Moagem_1	21:05	23:00	01:55	115	B	Produção	350-CI-101	Obstrução	Obstrução na ciclonagem 350-CI-101.
11	Moagem_2	00:00	00:47	00:47	47	B	Mecânica	350-MO-102	Reposição	Repor parafusos no acoplamento do 350-MO102, motor auxiliar do moinho.
11	Moagem_2	00:48	07:00	06:12	372	B	Produção	350-MO-101	Nível Baixo	Baixo estoque de minério.
11	Moagem_2	07:00	19:00	12:00	720	C	Produção	350-MO-101	Nível Baixo	Baixo estoque de minério.
11	Moagem_2	19:00	23:59	04:59	299	B	Produção	350-MO-101	Falta de Minério	Baixo estoque de minério.
12	Moagem_1	13:11	16:48	03:37	217	A	Mecânica	350-MN-002A	Inspeção	Abertura da janela de visita do 515-B0001.
12	Moagem_2	13:16	17:32	04:16	256	A	Produção	350-MN-002B	Obstrução	parada devido obstrução na caixa de alimentação no moinho 01.
13	Moagem_1	10:58	14:48	03:50	230	A	Mecânica	350-BP-001A-M	Baixa Pressão	Moagem 01 parada devido baixa eficiência na 340 PB-01/A, ocasionando obstrução no 350 TQ-04.

Figura 5 – Quadro como imagem: Modelo de planilha para registro de paradas da produção.

Fonte: Autoria própria (2023).

Por fim, é importante considerar as paradas que não são atribuídas a um equipamento específico, e sim para a área geral. Esses lançamentos ocorrem quando a falha é conjunta e não deve ser atribuída a um único ativo, por exemplo, quando ocorre falta de abastecimento da rede elétrica por parte da concessionária distribuidora de energia, quando ocorrem paradas programadas para toda a área em questão ou quando ocorre a falta de minério para processamento.

Logo, todas as paradas que se enquadrem nessas condições devem ser lançadas no centro de custo geral da área, neste caso 350-MN-002, equivalente a área da Moagem. Desta forma, durante a análise de dados nenhum ativo será prejudicado por lançamentos gerais e, a área geral em questão, passará a possuir informações próprias de paradas, permitindo maior controle sobre os eventos e maior precisão na definição do perfil de perdas do setor.

2.7 Confiabilidade em Função do Tempo (R_t)

De acordo com Rausand e Hoyland (2003), a confiabilidade pode ser medida através da seguinte função exponencial de decaimento " $R(t) = e^{(-\lambda t)}$ ". Para os autores, é possível relacionar a taxa de falhas (λ) e o tempo (t), e traçar curvas de confiabilidade em função destas duas variáveis.

A taxa de falhas, por sua vez, pode ser descrita como o inverso do tempo médio entre falhas (MTBF), deste modo, obtém-se algebricamente, através da formulação enunciada na seção de indicadores (2.4.1), que: " $\lambda = \frac{1}{MTBF}$ ". Deste modo, associa-se para a taxa de falhas o inverso do tempo (t^{-1}) como unidade de medida.

De acordo com a NBR 5462 (1994), a taxa de falhas é a frequência com que se ocorre a falha, através da mesma norma é definida como a ausência de capacidade de desempenhar uma função requerida. Deste modo, ao se reduzir a taxa de falhas de um determinado equipamento ou modo de falha, obtém-se, numericamente, o aumento da confiabilidade em um dado instante (t).

Sendo assim, de modo a apresentar o decaimento ocasionado pela função exponencial da confiabilidade, a figura a seguir ilustra, para dois distintos itens, o comportamento da confiabilidade em função do tempo:

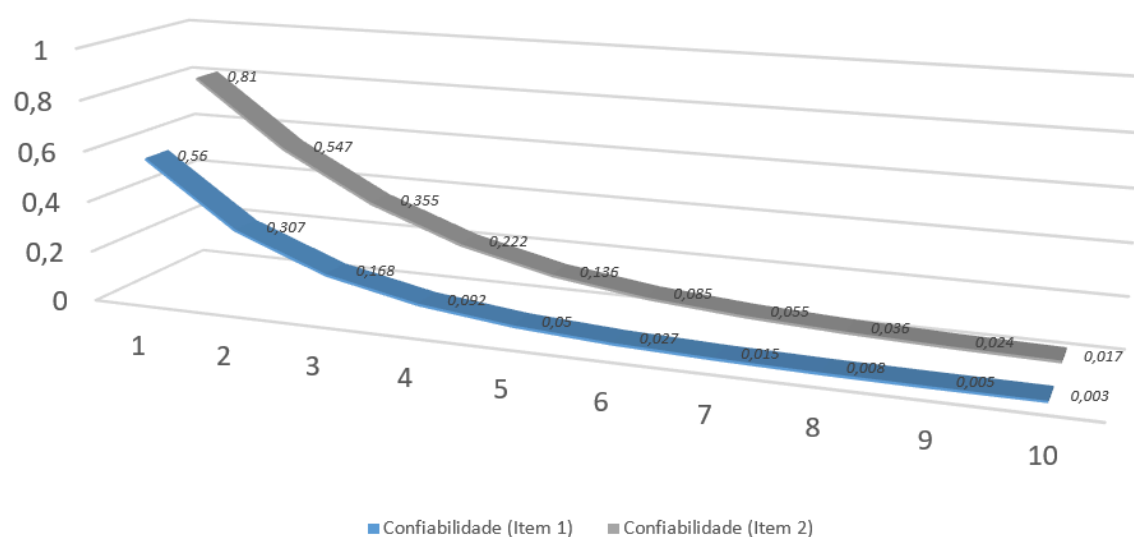


Figura 6 – Exemplo de curva exponencial de decaimento da confiabilidade (R_t).

Fonte: Autoria própria (2023).

Logo, durante as futuras abordagens metodológicas, ao se assumir o aumento da confiabilidade após a aplicação de um determinado método, deve-se entender que, baseado no gráfico da confiabilidade em função do tempo, o método induziu a redução da taxa de falhas e o consequente aumento da confiabilidade (R_t) em um dado instante (t).

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa adota uma abordagem estruturada para a análise de modos de falha, sendo aplicada no setor de moagem em uma planta de beneficiamento mineral. Deste modo, é realizado, inicialmente, a coleta e o tratamento do banco de dados que obtém as informações de paradas de área, sendo informado, via operação, os horários de parada de área, horários de retorno de produção, tempos totas de parada, equipamentos, causas, turnos, áreas, setores e observações, conforme abordado na "Figura 5". Dentre os ajustes básicos em um banco de dados, encontram-se:

- Convencionalizar o sistema de ponto e vírgula para o padrão brasileiro, se necessário;
- Corrigir erros ortográficos, sintáticos e semânticos, bem como erros de acentuação, pontuação e simbologia, se necessário;
- Garantir a divisão das informações em colunas, de modo a estruturar a análise dos dados;
- Analisar apontamentos, buscando identificar se houveram falsas indicações por parte da operação, seja ao escrever TAG de forma incorreta ou indicar o equipamento errado.

Os ajustes supracitados, intrínsecamente, entregam certa análise inicial. No entanto, visam apenas a correção e a adequação do banco de dados à um padrão que possibilite os subsequentes aprofundamentos. Desta forma, permite-se o desenvolvimento das etapas seguintes da pesquisa, onde são avaliadas algumas distintas metodologias de análise, priorização e tratamento dos mais distintos modos de falha ocorridos na área.

A avaliação dos métodos permite definir os pontos fortes e fracos de cada uma das metodologias escolhidas, bem como definir qual o seu cenário ideal para aplicação. Sendo assim, o objetivo principal de investigar métodos para aumentar a confiabilidade da moagem passa a ser possível e melhor estruturado.

Após a realização dos ajustes no banco de dados, aplicação das ferramentas de análise de falhas e a definição do método mais aplicável, ocorre a priorização das falhas e o estabelecimento das tratativas e caminho crítico. Desta forma, após a mitigação dos principais modos de falha, espera-se identificar, em função do tempo, o aumento da confiabilidade da área e a redução da incidência dos principais problemas relatados em área.

É válido ressaltar que a presente análise representa um ciclo de melhoria contínua, devendo ser repetido periodicamente, de modo a cercar os eventos mais recentes e mais vívidos no cenário produtivo. A presente pesquisa aborda os distintos métodos e os seus melhores cenários de aplicação, mas busca enfatizar que, sem a implementação de uma rotina cíclica de análise, priorização e tratativa, não é possível se alcançar o objetivo final de aumento da

confiabilidade e eficiência. Adicionalmente, é importante considerar que, embora a presente pesquisa apresente a análise em um setor de moagem, as metodologias podem ser extrapoladas para os mais variados cenários produtivos, desde que estes possuam as condições de contorno necessárias, conforme abordado no "Capítulo 2".

Em resumo, as seções e subseções a seguir abordarão: a introdução à respeito do presente estudo (1), a revisão bibliográfica necessária para o aprofundamento do tema (2), as explicações sobre a forma em que será organizada a presente pesquisa (3) e as diferentes metodologias definidas para desenvolvimento do estudo (3.1), a aplicação, a análise e a discussão sobre os distintos métodos (4) e as considerações finais a respeito da abordagem empregada e dos respectivos resultados obtidos (5). Desta forma, será seguido o fluxo de coletar as informações gerais e do banco de dados, aplicar os distintos métodos para análise e priorização de falhas e, por fim, identificar as vantagens e desvantagens de cada cada abordagem analisada.

3.1 Metodologias para Análise de Falhas

Os tópicos a seguir abordarão as metodologias a serem utilizadas na presente pesquisa e, adicionalmente, a forma como serão utilizadas durante as análises dos modos de falhas e suas respectivas priorizações.

3.1.1 Métodos Lean Six Sigma

3.1.1.1 *Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)*

A metodologia *Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)* será abordada através de tabela, onde serão expostos e classificados, quantitativamente, os principais modos de falhas, de modo a priorizar - via Índice de Prioridade de Risco (RPN) - a ordem das tratativas para as falhas existentes e potenciais.

Equipamento	Modo de Falha	Severidade (S)	Ocorrência (O)	Detecção (D)	RPN (S x O x D)	Ações Corretivas
TAG 1	Falha A	1	2	3	6	Ação 1
TAG 2	Falha B	2	3	4	24	Ação 2
TAG 3	Falha C	3	4	5	60	Ação 3
TAG 4	Falha D	4	5	6	120	Ação 4
TAG 5	Falha E	5	6	7	210	Ação 5
TAG 6	Falha F	6	7	8	336	Ação 6
TAG 7	Falha G	7	8	9	504	Ação 7
TAG 8	Falha H	8	9	10	720	Ação 8
TAG 9	Falha I	9	10	1	90	Ação 9
TAG 10	Falha J	10	1	2	20	Ação 10

Quadro 1 – Modelo de tabela para aplicação do FMEA

Fonte: Autoria própria (2023).

A tabela acima ilustra o formato a ser utilizado durante a aplicação do método para os modos de falhas registrados no banco de dados de paradas de produção da Moagem analisada na presente pesquisa.

Durante a aplicação do método, visando restringir a análise apenas às paradas de grande impacto, serão selecionados os eventos que possuíam duração superior a 10 horas e estes serão distribuídos dentre as linhas da tabela de FMEA. Sendo assim, cada modo de falha terá o rótulo do equipamento onde ocorreu e será classificado com base na severidade, frequência de ocorrência e facilidade de detecção. Além disso, durante sua realização, a participação de colaboradores externos, em grupos multidisciplinares, se fará necessário.

A tabela a seguir, traduzida e adaptada do "FMEA Handbook" da Ford (2011), denota os critérios a serem utilizados para se classificar severidade:

Classificação	Efeito	Gravidade do Efeito
10	Falha em Cumprir Requisitos de Segurança e/ou Regulamentação	Modo de falha potencial afeta a produção segura e/ou envolve o não cumprimento da regulamentação governamental sem aviso prévio.
9	Falha em Cumprir Requisitos de Segurança e/ou Regulamentação	Modo de falha potencial afeta a produção segura e/ou envolve o não cumprimento da regulamentação governamental com aviso.
8	Perda ou Degradação da Função Primária	Perda da função primária (equipamento inoperável).
7	Perda ou Degradação da Função Primária	Degradação da função primária (equipamento operável, mas com desempenho reduzido).
6	Perda ou Degradação da Função Secundária	Perda da função secundária (equipamento operável, mas funções secundárias inoperantes).
5	Perda ou Degradação da Função Secundária	Degradação da função secundária (equipamento operável, mas funções secundárias com desempenho reduzido).
4	Incômodo	Aparência ou Ruído Audível, equipamento operável, item não está conforme e é notado facilmente.
3	Incômodo	Aparência ou Ruído Audível, equipamento operável, item não está conforme e é notado esporadicamente.
2	Incômodo	Aparência ou Ruído Audível, equipamento operável, item não está conforme e é notado preditivamente.
1	Sem Efeito	Sem efeito discernível.

Quadro 2 – Tabela para classificação de severidade de falha.

Fonte: Adaptado de Ford (2011).

A tabela a seguir, também traduzida e adaptada do "FMEA Handbook" da Ford (2011), denota os critérios a serem utilizados para se classificar ocorrência:

Classificação	Probabilidade de Falha	Ocorrência da Causa	Incidência
10	Muito Alto	Falha é certa	100 por mil (1 em 10 horas)
9	Alto	Falha é inevitável	50 por mil (1 em 20 horas)
8	Alto	Falha é provável	20 por mil (1 em 50 horas)
7	Alto	Falha é incerta	10 por mil (1 em 100 horas)
6	Moderado	Falhas é frequente	2 por mil (1 em 500 horas)
5	Moderado	Falhas é ocasional	0,5 por mil (1 em 2.000 horas)
4	Moderado	Falha é isolada	0,1 por mil (1 em 10.000 horas)
3	Baixo	Falha é muito isolada	0,01 por mil (1 em 100.000 horas)
2	Baixo	Nenhuma falha	0,001 por mil (1 em 1.000.000 horas)
1	Muito Baixo	A falha é eliminada através do controle preventivo.	A falha é eliminada através do controle preventivo.

Quadro 3 – Tabela para classificação de ocorrência de falha.

Fonte: Adaptado de Ford (2011).

A tabela a seguir, também traduzida e adaptada do "FMEA Handbook" da Ford (2011), denota os critérios a serem utilizados para se classificar detecção:

Classificação	Deteção	Dificuldade	Probabilidade
10	Não detectável	Não pode ser detectado ou não é analisável	Quase impossível
9	Impraticável de- tecção	Detectável com métodos inviáveis e muito espe- cíficos	Muito Remoto
8	Desafiadora de- tecção	Detectável com métodos viáveis mas muito espe- cíficos	Remoto
7	Desafiadora de- tecção	Detectável com métodos viáveis mas específicos (equipamentos)	Muito Baixo
6	Difícil deteção	Detectável com métodos viáveis mas específicos (subconjuntos)	Baixo
5	Moderada deteção	Detectável com métodos viáveis e moderada- mente específicos	Moderado
4	Considerável deteção	Detectável com métodos viáveis e pouco espe- cíficos	Moderadamente Alto
3	Fácil deteção	Detectável com métodos viáveis e nada espe- cíficos	Alto
2	Fácil deteção	Detectável com métodos preditivos	Muito Alto
1	Não aplicável	A causa da falha ou modo de falha não pode ocorrer porque é totalmente prevenida preventi- vamente	Quase Certa

Quadro 4 – Tabela para classificação de detecção de falha.

Fonte: Adaptado de Ford (2011).

Após a avaliação dos parâmetros de severidade, frequência de ocorrência e facilidade de detecção, serão obtidos os valores de RPN, permitindo a priorização, via peso, de cada um dos eventos. Desta forma, será possível definir a tratativa para cada um dos modos de falha analisados e as posteriores definições de planos de ação. No entanto, para os devidos fins de estudo, o desenvolvimento de tratativas ou planos de ação ultrapassam o escopo, limitando a pesquisa à análise dos modos de falha e às respectivas priorizações.

3.1.1.2 Perfil de Perdas

A metodologia de Perfil de Perdas será abordada, durante as análises, através do princípio de Pareto que, de acordo com Delers (2023), "provém da observação de que 20% das causas são responsáveis por 80% dos efeitos". Deste modo, o Perfil de Perdas estratificará, dentre todos os equipamentos e dentre os mais distintos modos de falha, quais representam e causam maior impacto produtivo. Segundo Ramos (2020), "É através do perfil de perdas que as falhas recorrentes nos equipamentos são identificadas e tratadas por meio do plano de ação". Sendo assim, a análise estará direcionada à identificar os pontos de maiores perdas de produtividade, sempre com a ideia de que a menor parte dos modos de falha - e equipamentos - causam a maior parte das perdas.

É importante salientar que a aplicação do método ocorrerá através de ferramentas de *business intelligence* (BI), submetendo o bancos de dados à *softwares* específicos de tratamento que possibilitem a geração das diagramações de Pareto, para avaliar principais equipamentos e modos de falhas.

A figura a seguir representa o conceito base para o desenvolvimento de Diagrama de Pareto - sendo aplicado à estratificação de equipamentos - visando a definição de um dado perfil de perdas:

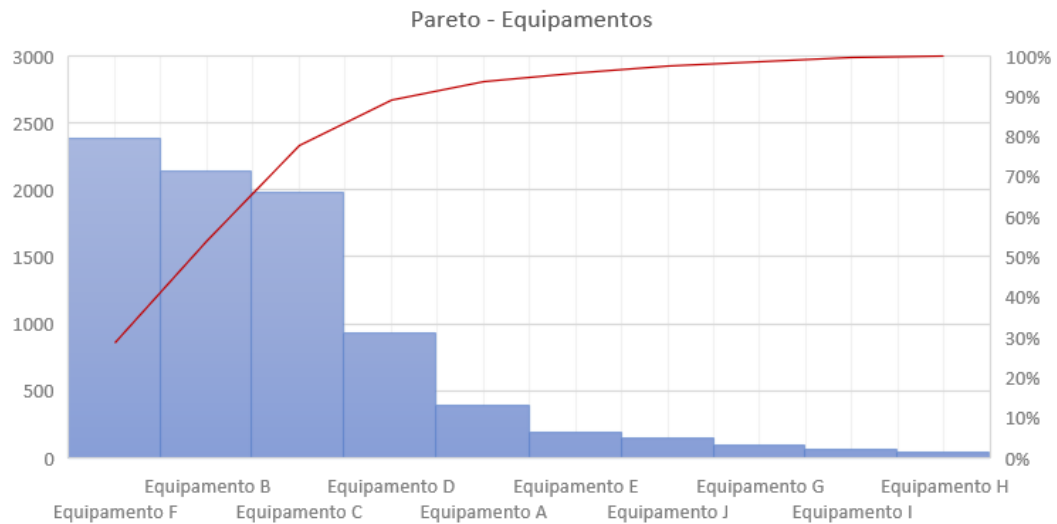


Figura 7 – Modelo de diagrama de Pareto aplicado à equipamentos.

Fonte: Autoria própria (2023).

A figura a seguir, por sua vez, também apresenta o conceito base para o desenvolvimento de um Diagrama de Pareto para um determinado perfil de perdas, mas visa explorar a estratificação dos principais modos de falha:

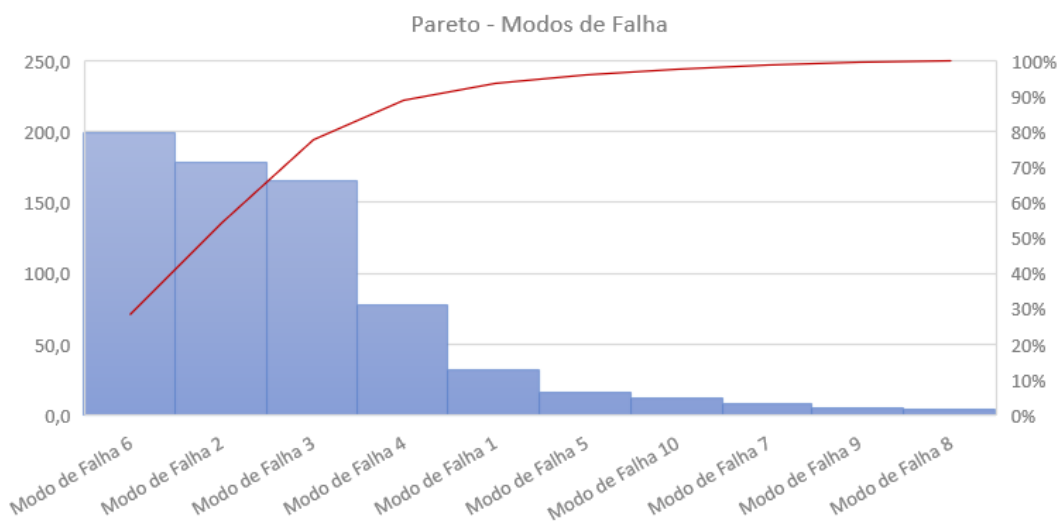


Figura 8 – Modelo de diagrama de Pareto aplicado à modos de falha.

Fonte: Autoria própria (2023).

Os modelos acima exemplificam os fundamentos do Perfil de Perdas, via Pareto, organizando os equipamentos através do decrescimento da criticidade e da presença da linha de Pareto, onde se informa o percentual do impacto para cada coluna.

A ideia geral deste método, para as finalidades do presente estudo, será permitir a análise dos elementos mais críticos da Moagem, se baseando nos registros contidos no banco de dados. A definição do plano de ação, que deve surgir de forma posterior à análise, não estará sujeita ao escopo da presente pesquisa. Em resumo, o foco principal estará - mais uma vez - em analisar os dados e definir o Perfil de Perdas.

3.1.1.3 5 Porquês

A metodologia do 5 Porquês será abordada, durante as análises, com um *looping* de perguntas sequenciais. De acordo com Augusto (2021) os 5 Porquês são "uma ferramenta para identificar a causa raiz do problema se questionando o porque da situação a cada vez que há uma resposta". Sasdelli (2012) complementa que, embora simples, o método é efetivo em ajudar à entender as causas da ocorrência de problemas. Deste modo, durante sua realização, a participação de colaboradores externos, em grupos multidisciplinares, se fará necessário.

Desta forma, a análise estará pautada em avaliar todos os modos de falha, distintos entre si, e analisar profundamente os fatores que ocasionaram, de fato, cada uma das paradas para manutenção. A tabela a seguir estabelece o formato a ser utilizado para o desenvolvimento do método, de modo a elencar por linha cada uma das falhas e, através de suas colunas, ser feito o aprofundamento a respeito das causas raízes:

Modo de Falha	1 - Porquê?	2 - Porquê?	3 - Porquê?	4 - Porquê?	5 - Porquê?

Quadro 5 – Modelo de tabela para aplicação dos 5 porquês.

Fonte: Autoria própria (2023).

A tabela para aplicação dos 5 Porquês apresenta, apesar de sua simplicidade, a possibilidade de analisar os mais diversos modos de falha e, adicionalmente, pode permitir que as cinco perguntas se estendam a um número ainda maior. No entanto, apesar das possibilidades, utiliza-se como padrão os cinco questionamento - embora não exista nenhuma proibição à respeito da modificação do método.

Em geral, para a presente metodologia, se é empregado um plano de ação após as definições das diversas causas raízes. Contudo, assim como para os demais métodos, a pesquisa restringe seu escopo à análise dos modos de falha e a forma como isso ocorre através de cada metodologia.

Por fim, é válido ressaltar que, dentre os métodos apresentados para o subtópico de "Métodos Lean Six Sigma (3.1.1)", a análise via 5 Porquês é a única com abordagem qualitativa, diferentemente da abordagem quantitativa presente nos demais métodos supracitados. Todavia, as diferentes formas de se abordar as análises de falhas são objetos de estudo e, com isso, devem ser vistos ao longo da pesquisa como ferramentas estritamente metodológicas.

3.1.2 Métodos Estratégicos de Confiabilidade

3.1.2.1 Reliability Centered Maintenance (RCM)

A metodologia de *Reliability Centered Maintenance* (RCM) será desenvolvida com o intuito de analisar os nuances de cada modo de falha. A ideia principal do método consiste avaliar os cenários macroscópicos e microscópicos de cada ocorrência, investigando e avaliando cada parte da ocorrência. Tavares (2012) afirma que a metodologia "é definida como um processo usado para determinar o que deve ser feito para garantir que um qualquer equipamento ou sistema continue a fazer o que os seus utilizadores querem que ele faça no seu contexto de operação atual". Deste modo, durante sua realização, a participação de colaboradores externos, em grupos multidisciplinares, se fará necessário.

Tavares (2012) e Moubray (1997) complementam que, para se definir o que dever ser feito e garantir as entregas, é necessário se responder sete questões principais em um RCM:

1. "Quais as funções do equipamento no seu contexto operacional?"
2. "De que maneiras podem essas funções falhar?"
3. "O que causa cada falha de função?"
4. "O que acontece quando uma falha ocorre?"
5. "Qual a importância das consequências de cada falha?"
6. "O que pode ser feito para prever ou prevenir cada falha?"
7. "O que fazer quando não é possível ou justificável uma política de manutenção proativa?"

Com esta abordagem se torna possível avaliar o comportamento macroscópico de cada ocorrência, entendendo o aspecto processual que o contorna, e os nuances microscópicos, como os efeitos da falha e a criticidade atribuída à uma dada ocorrência para o sistema como um todo. A partir das análises, assim como ocorre para os demais métodos abordados, se torna necessário o desenvolvimento de planos de ação com as ações necessárias para se mitigar ou se contornar os modos de falha e, do mesmo modo, a abordagem do presente estudo se restringirá à investigar o mecanismo de análise, sem se preocupar diretamente em quais são os melhores parâmetros para se definir as ações.

De modo geral, o uso da metodologia de *Reliability Centered Maintenance* (RCM) envolve a suposição de quais modos de falha podem vir a ocorrer em um determinado equipamento. A análise busca identificar as possibilidades de ocorrências através do entendimento das funções do equipamento, do cenário em que está disposto, tudo isso com base na expertise do grupo multidisciplinar envolvido na análise. As explicações ou definições de como se organizar e

3.1.2.2 Diagrama Jack-Knife

A metodologia do Diagrama *Jack-Knife* será abordada, durante as análises, como um gráfico de dispersão logarítmica. Conforme afirma Knights (2004), o método se destaca por identificar as variáveis que influenciam o tempo de inatividade do equipamento, como a frequência de falhas e o tempo médio de reparo (MTTR). O autor complementa que os diagramas Jack-Knife, com dispersões logarítmicas, são divididos em quatro quadrantes, de forma a classificação das falhas de acordo com suas características, o que facilita a análise da causa raiz.

Os quatro quadrantes existentes no diagrama possuem nomenclaturas específicas e, de acordo com Jacobs et al. (2022), são classificados como: quadrante de falhas agudas, quadrante de falhas críticas, quadrante de falhas crônicas e quadrante de falhas leves. A figura a seguir ilustra a forma como será abordado o diagrama Jack-Knife, evidenciando as suas divisões em quadrantes e as suas respectivas nomenclaturas e posições:

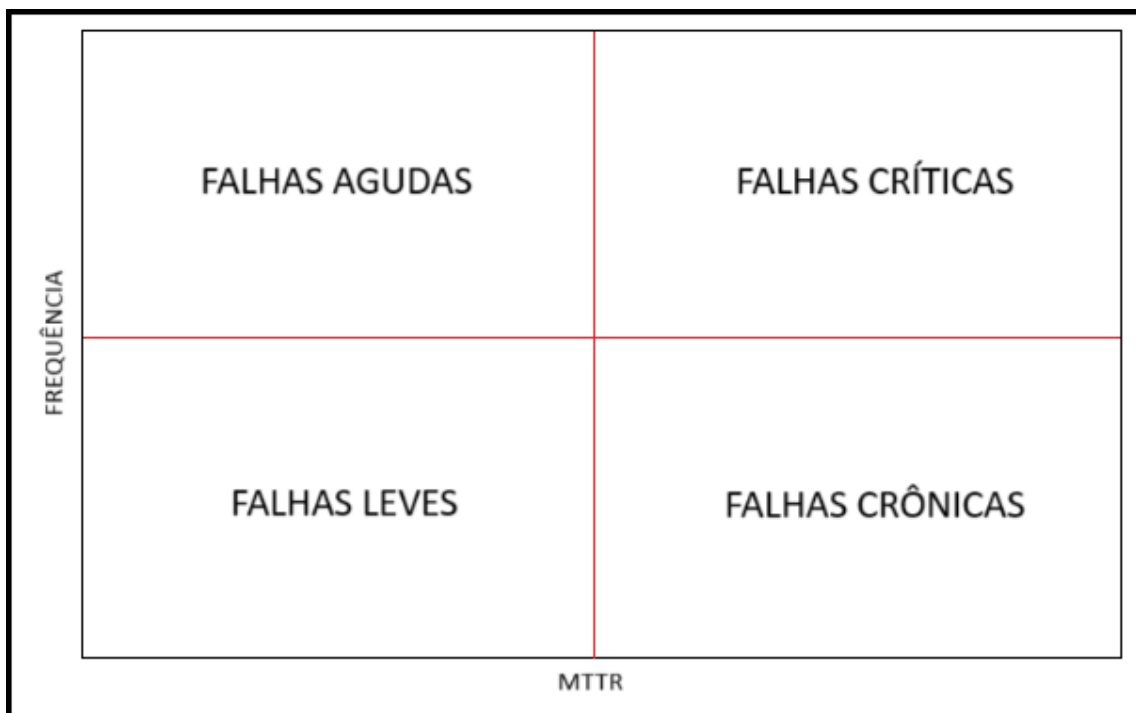


Figura 10 – Diagrama Jack-Knife.

Fonte: Adaptado de Jacobs et al. (2022).

As linhas em vermelho, representam os limites entre quadrantes e, por sua vez, podem possuir posicionamento variável - em função dos valores do banco de dados - sendo valores médios fixos ou valores pré-definidos pelo analista. Para diagramas com o posicionamento variável dos limites entre os quadrantes, Knights (2004) apresenta as formulações a seguir para obtenção do valor para a posição da linha horizontal (frequência) e vertical (MTTR):

$$Limite_{(MTTR)} = \frac{D}{n} \quad (3.1)$$

$$Limite(Frequencia) = \frac{n}{Q} \quad (3.2)$$

Onde,

- **D:** *downtime* ou somatório do tempo de indisponibilidade;
- **n:** frequência ou somatório do número de ocorrências;
- **Q:** número de categorias distintas ou tipos de falhas que ocorreram.

No diagrama, os modos de falha serão dispostos logaritmicamente em função dos seus respectivos valores de MTTR e frequência. A posição do modo de falha indicará o seu grau de criticidade para a produção, de modo que, as disposições mais próximas da extremidade superior direita do diagrama serão considerados como mais críticos e as disposições mais próximas da extremidade inferior esquerda do diagrama serão considerados como mais leves. Para as falhas agudas e crônicas, o grau de prioridade ficará a critério do analista de dados quando as distâncias entre extremidades coincidirem.

3.1.2.3 Relações Intermetodológicas

A seção de relações intermetodológicas visará a classificação dos métodos escolhidos para estudo em relação aos seguintes critérios:

- Complexidade;
- Subjetividade;
- Mensurabilidade;
- Assertividade.

O critério utilizado para a classificação dos métodos, em relação à complexidade, será baseado no "Gráfico de Complexidade (*Big-O*)", conforme abordagem de Shindler et al. (2022), onde a complexidade é representada pelo número de processamentos necessários e o tempo gasto para realização.

A subjetividade e a mensurabilidade, por sua vez, serão classificadas com base nos embasamentos de Ramos et al (2016), trazendo a visão de quanto um método poder ser representado qualitativamente ou quantitativamente para a definição dos seus respectivos parâmetros, durante a classificação.

Por fim, a assertividade será classificada através da adaptação das ideias de Moraes et al. (2017), correlacionando o termo com a capacidade de asserto em identificações ou previsões, conforme o esperado por sua estratégia.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Banco de Dados

A empresa analisada possui, dentre os seus principais processos, a rotina de registrar paradas de produção. Os registros são realizados via "Sala de Controle", que é a unidade de operação responsável por monitorar, configurar e operar equipamentos, além de realizar os apontamentos de indisponibilidade ou inutilização de área.

Os registros permitem o armazenamento de informações cruciais para análise dos processos de operação e de manutenção. A partir das informações contidas no banco de dados, são calculados indicadores de performance, aplicados métodos de análise de falhas e definidas as ações para mitigar os eventos mais críticos.

A existência da rotina de registro de paradas de produção, em tempo real, surge como condição de contorno para a aplicação dos diversos métodos avaliados nesta pesquisa. Sem a existência de apontamentos ou com o *input* de lançamentos incorretos, os dados deixam de ser "confiáveis" e passam a ter o uso "não recomendado".

Deste modo, as informações obtidas para este estudo refletem o cenário de paradas de produção de uma moagem, em uma mineradora, tendo o período limitado ao primeiro semestre do ano de 2023. As informações são reais e foram coletadas através de diversas planilhas, uma para cada mês, nomeadas como "Paradas de Produção". Portanto, todos os métodos que serão abordados nas próximas seções farão o uso irrestrito deste banco de dados.

4.2 *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA)

Para a aplicação do *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA), foi necessária a realização de reunião multidisciplinar. No presente caso, foram envolvidos membros das equipes de operação (técnico e operador), manutenção (técnico, engenheiro e inspetor), saúde e segurança ocupacional (técnico) e meio ambiente (técnico). Desta forma, os seguintes passos foram seguidos:

- Classificação do banco de dados;
- Remanejamento para a tabela de análise;
- Análises e definição do RPN (S x O x D);
- Priorização dos modos de falha.

4.2.1 Classificação do Banco de Dados

A base de dados de paradas de produção da moagem, referente ao primeiro semestre de 2023, obteve o número total de 291 registros de parada. Alguns dos registros, por excederem o horário limite de turno, possuem mais de um lançamento, embora representem um mesmo evento.

Desta forma, a figura abaixo (11), classifica os modos de falha com módulo de duração decrescente, de modo a priorizar os eventos a serem analisados na etapas seguintes:

Setor	Equipamento	Início	Termino	Duraca	Causa	Observações	Tipo	Turno
Mecânica	350-MO-101	14/01/2023	14/01/2023	12	Quebrado	Redutor do moinho 01 apresentou fumaça e desalinhamento da correia desaguadora do filtro.	DF	A
Mecânica	350-MO-101	15/01/2023	15/01/2023	12	Outros	MO-101 sem o rolamento do redutor.	DF	A
Mecânica	350-MN-002B	16/01/2023	16/01/2023	12	Outros	MO-101 sem o rolamento do redutor.	DF	D
Mecânica	350-MN-002B	17/01/2023	17/01/2023	12	Outros	MO-101 sem o rolamento do redutor.	DF	D
Mecânica	350-MO-101	20/01/2023	20/01/2023	12	Inspeção	Área parada devido inspeção no revestimento.	DF	C
Mecânica	350-MO-101	28/01/2023	28/01/2023	12	Outros	Manutenção no redutor do moinho	DF	C
Mecânica	350-MO-001	14/01/2023	14/01/2023	11,7	Quebrado	Redutor do moinho 01 apresentou fumaça e desalinhamento da correia desaguadora do filtro.	DF	A
Mecânica	350-MO-101	11/02/2023	11/02/2023	11,3	Falha de equip.	Falha no sistema de graxa do 350-MO-101.	DF	B
Mecânica	350-BP-002	20/03/2023	20/03/2023	8,2	Vazamento	área parada para a manutenção sanar vazamento no recalque da 350 BP-02/A e B.	DF	A
Mecânica	350-MO-101	08/03/2023	08/03/2023	7,7	Vazamento	Troca da chave de alinhamento, tensionamento do tecido do filtro e sanar vazamento na caneta de alimentação do moinho.	DF	B
Mecânica	350-MO-001	13/01/2023	14/01/2023	7	Quebrado	Redutor do moinho 01 apresentou fumaça e desalinhamento da correia desaguadora do filtro.	DF	B
Mecânica	350-MO-101	13/01/2023	14/01/2023	7	Quebrado	Redutor do moinho 01 apresentou fumaça e desalinhamento da correia desaguadora do filtro.	DF	B
Mecânica	350-MO-101	14/01/2023	15/01/2023	7	Outros	MO-101 sem o rolamento do redutor.	DF	C
Mecânica	350-MO-101	15/01/2023	16/01/2023	7	Outros	MO-101 sem o rolamento do redutor.	DF	C
Mecânica	350-MN-002B	16/01/2023	17/01/2023	7	Outros	MO-101 sem o rolamento do redutor.	DF	A
Mecânica	350-MN-002B	17/01/2023	18/01/2023	7	Outros	MO-101 sem o rolamento do redutor.	DF	A
Mecânica	350-MO-101	27/01/2023	28/01/2023	7	Outros	Parado para manutenção atuar no redutor do moinho	DF	D
Mecânica	350-BP-102B	20/03/2023	21/03/2023	7	Baixa vazão	Baixa eficiência da BP-102B e a 1012A esta desmontada.	DF	C
Elétrica	350-MN-002B	06/04/2023	07/04/2023	7	Queimado	Queimar do motor auxiliar MO-102 M1.	DF	A
Mecânica	350-BP-002	20/02/2023	20/02/2023	6,8	Travado	Desarme na BP-002B por sobre temperatura do interno e vazamento no corpo da bamba, BP-002 A travada.	DF	B
Mecânica	350-MO-101	20/02/2023	20/02/2023	6,8	Travado	Desarme na BP-002B por sobre temperatura do interno e vazamento no corpo da bamba, BP-002 A travada.	DF	B
Mecânica	350-BP-102B	21/03/2023	21/03/2023	6,6	Outros	parada devido baixa eficiência da BP-102 B e BP-102 A segue desmontada e entregue a manutenção.	DF	D
Instrumentação	350-CI-102	25/04/2023	26/04/2023	6,3	Defeito	parada devido instrumento de PSI do ciclone danificado.	DF	D
Mecânica	350-BP-101B	08/03/2023	09/03/2023	6	Vazamento	vazamento na linha da tubulação da BP-101 A/B.	DF	D
Mecânica	370-FI-001	03/06/2023	03/06/2023	5,7	Quebrado	Quebra da fita selagem do 370-FI-001, e troca da célula de carga da balança da TR-006.	DF	B
Mecânica	350-MO-101	03/06/2023	03/06/2023	5,7	Quebrado	Quebra da fita selagem do 370-FI-001, e troca da célula de carga da balança da TR-006.	DF	B
Mecânica	350-MN-002A	31/01/2023	31/01/2023	5,6	Falta de minério	área parada devido falta de minério.	DF	A
Mecânica	370-FI-001	01/05/2023	02/05/2023	5,3	Quebrado	Moagem 01 e02 parada devido quebra da fita de selagem do 370 FI-01.	DF	A
Mecânica	350-MO-001	29/06/2023	29/06/2023	5,3	Vazamento	Vazamento no parafuso do revestimento da MO-001.	DF	C
Elétrica	350-MO-101	07/04/2023	07/04/2023	5,3	Queimado	Queimar do motor auxiliar MO-102 M1.	DF	D
Mecânica	350-MO-101	29/06/2023	29/06/2023	5,3	Vazamento	Vazamento no parafuso do revestimento da MO-001.	DF	C
Elétrica	350-AL-002B	10/03/2023	10/03/2023	5,2	Queimado	Queima do motor da AL-002B, e o AL-002A não atende as duas moagem.	DF	C
Instrumentação	350-CI-102	26/04/2023	26/04/2023	5,2	Defeito	parada devido instrumento de PSI do ciclone danificado.	DF	C
Mecânica	370-FI-001	01/05/2023	02/05/2023	5,2	Quebrado	Moagem 01 e02 parada devido quebra da fita de selagem do 370 FI-01.	DF	A
Mecânica	350-MO-101	14/01/2023	14/01/2023	5	Outros	MO-101 sem o rolamento do redutor.	DF	C
Mecânica	350-MO-101	15/01/2023	15/01/2023	5	Outros	MO-101 sem o rolamento do redutor.	DF	C
Mecânica	350-MN-002B	16/01/2023	16/01/2023	5	Outros	MO-101 sem o rolamento do redutor.	DF	A
Mecânica	350-MN-002B	17/01/2023	17/01/2023	5	Outros	MO-101 sem o rolamento do redutor.	DF	A
Mecânica	350-MO-101	27/01/2023	27/01/2023	5	Outros	Parado para manutenção atuar no redutor do moinho	DF	D
Mecânica	350-MO-101	28/01/2023	28/01/2023	5	Outros	Manutenção no redutor do moinho	DF	B
Mecânica	350-MN-002B	06/04/2023	06/04/2023	5	Corrente Alta	ea parada devida corrente alto no motor auxiliar do moinho 02.	DF	A
Mecânica	350-MO-101	10/04/2023	10/04/2023	5	Reposição	Repor parafusos no acoplamento do 350-MO102, motor auxiliar do moinho.	DF	B

Figura 11 – Quadro como imagem: Classificação do banco de dados.

Fonte: Autoria própria (2023).

Após a classificação, via decrescimento de duração, os lançamentos foram filtrados e mantidos apenas os eventos de duração superior à 5 (cinco) horas; com o tempo definido de forma arbitrária pela equipe analista. A figura (11) aborda a filtragem dos dados e, tendo suas informações como base, permitirá a realização posterior do remanejamento das informações para a planilha de análise. É interessante observar que, após a filtragem dos dados, as primeiras 42 linhas - de um banco de 291 lançamentos - passam a representar cerca de 40% do somatório das horas de duração, totalizando 300 horas de parada para os apontamentos selecionados. Deste modo, obtém-se um melhor direcionamento para a aplicação do método do FMEA. Através da classificação, a análise virá a ser menos complexa e mais assertiva, permitindo a interação mais direta do grupo analista com os dados. Afinal, de acordo com Teixeira (2003), "a fase do tratamento do material leva o pesquisador à teorização sobre os dados, produzindo o confronto entre a abordagem teórica anterior e o que a investigação de campo aporta de singular". Sendo assim, a próxima etapa ficará a cargo de tratar os lançamentos já filtrados e realizar o *input* das informações na planilha de FMEA.

4.2.2 Remanejamento de Dados

A figura a seguir (12), apresenta as informações que serão submetidas a planilha de FMEA, para a realização da posterior análise dos modos de falha. As informações, como dito, são provenientes do tratamento das 42 linhas filtradas e classificadas do banco de dados das paradas de produção:

Equipamento	Modo de Falha
350-MO-101	Superaquecimento no redutor do moinho
350-MO-101	Inspeção do revestimento interno do moinho
370-FI-001	Desalinhamento da correia desaguadora do filtro
350-BP-002A	Vazamento na linha de recalque da bomba de polpa
370-FI-001	Distensionamento do tecido do filtro
350-BP-102B	Baixa eficiência da bomba de polpa
350-MO-101	Queima do motor auxiliar de acionamento do moinho
350-BP-002A	Travamento do rotor da bomba de polpa
350-BP-002B	Desarme por superaquecimento da bomba de polpa
350-CI-102	Falha no instrumento medidor de pressão (PSI)
350-BP-101A	Vazamento na linha de recalque da bomba de polpa
370-FI-001	Quebra da fita de selagem do filtro
350-MN-002A	Parada por falta de minério
350-MO-001	Vazamentos nos parafusos do revestimento do moinho
350-AL-002B	Queima do motor do alimentador vibratório

Figura 12 – Quadro como imagem: Remanejamento para a tabela de análise.
 Fonte: Autoria própria (2023).

4.2.3 Análise e Definição de RPN

A figura a seguir (13) apresenta a análise e a definição do RPN para os modos de falha selecionados:

Equipamento	Modo de Falha	S	O	D	RPN	Ações Corretivas
350-MO-101	Superaquecimento no redutor do moinho	8	4	6	192	1 - Inspecionar folgas radiais e axiais dos rolamentos e engrenamentos; 2 - Substituir rolamentos de entrada, intermediários ou de saída (se necessário); 3 - Verificar especificação do óleo (comparar com manual); 4 - Verificar obstrução de dutos de lubrificação; 5 - Verificar alinhamentos entre motor, redutor e conjunto de acionamento.
350-MO-101	Inspeção do revestimento interno do moinho	1	1	1	1	Sem ações corretivas aplicáveis
370-FI-001	Desalinhamento da correia desaguadora do filtro	5	5	4	100	1 - Alinhar a correia desaguadora; 2 - Verificar integridade e alinhamento dos rolos; 3 - Verificar integridade e alinhamento dos tambores.
350-BP-002A	Vazamento na linha de recalque da bomba de polpa	7	5	3	105	1 - Substituir os trechos danificados; 2 - Avaliar se o material atende as demandas processuais.
370-FI-001	Distensionamento do tecido do filtro	5	5	4	100	1 - Tensionar ou substituir o tecido do filtro.
350-BP-102B	Baixa eficiência da bomba de polpa	7	5	2	70	1 - Verificar obstruções na bomba; 2 - Verificar a potência e os comandos elétricos.
350-MO-101	Queima do motor auxiliar de acionamento do moinho	6	4	2	48	1 - Substituir motor queimado; 2 - Garantir a ausência da aplicação direta de água sobre a carcaça.
350-BP-002A	Travamento do rotor da bomba de polpa	8	5	2	80	1 - Desobstruir a bomba; 2 - Substituir rotor (se necessário).
350-BP-002B	Desarme por superaquecimento da bomba de polpa	4	6	2	48	1 - Verificar obstruções na bomba; 2 - Verificar calibração dos sensores de temperatura; 3 - Melhorar ventilação do equipamento.
350-CI-102	Falha no instrumento medidor de pressão (PSI)	4	3	2	24	1 - Substituir medidor de pressão; 2 - Garantir o isolamento e a proteção adequada ao novo instrumento.
350-BP-101A	Vazamento na linha de recalque da bomba de polpa	7	5	3	105	1 - Substituir os trechos danificados; 2 - Avaliar se o material atende as demandas processuais.
370-FI-001	Quebra da fita de selagem do filtro	7	6	3	126	1 - Substituir a fita de selagem do filtro; 2 - Avaliar esforços anormais no sistema de filtragem.
350-MN-002A	Parada por falta de minério	1	1	1	1	Sem ações corretivas aplicáveis
350-MO-001	Vazamentos nos parafusos do revestimento do moinho	5	3	4	60	1 - Substituir parafusos (se necessário); 2 - Garantir torque adequado ao modelo (conferir procedimento).
350-AL-002B	Queima do motor do alimentador vibratório	8	3	4	96	1 - Substituir motor queimado; 2 - Garantir a ausência da aplicação direta de água sobre a carcaça.

Figura 13 – Quadro como imagem: Aplicação do FMEA.
 Fonte: Autoria própria (2023).

Com base nos tabelamentos dispostos no capítulo (3.1.1.1), os modos de falha foram analisados e classificados em relação a severidade, ocorrência e detecção. A definição destes três parâmetros permitem a definição do Índice de Prioridade de Risco (RPN). Através deste índice os modos de falha podem ser priorizados, conforme abordado na próxima seção.

4.2.4 Priorização dos Modos de Falha.

Tomando o RPN como base para priorização, os modos de falha da moagem passaram a ser elencados conforme a figura a seguir (14):

Equipamento	Modo de Falha	S	O	D	RPN	Ações Corretivas
350-MO-101	Superaquecimento no redutor do moinho	8	4	6	192	1 - Inspeccionar folgas radiais e axiais dos rolamentos e engrenamentos; 2 - Substituir rolamentos de entrada, intermediários ou de saída (se necessário); 3 - Verificar especificação do óleo (comparar com manual); 4 - Verificar obstrução de dutos de lubrificação; 5 - Verificar alinhamentos entre motor, redutor e conjunto de acionamento.
370-FI-001	Quebra da fita de selagem do filtro	7	6	3	126	1 - Substituir a fita de selagem do filtro; 2 - Avaliar esforços anormais no sistema de filtragem.
350-BP-002A	Vazamento na linha de recalque da bomba de polpa	7	5	3	105	1 - Substituir os trechos danificados; 2 - Avaliar se o material atende as demandas processuais.
350-BP-101A	Vazamento na linha de recalque da bomba de polpa	7	5	3	105	1 - Substituir os trechos danificados; 2 - Avaliar se o material atende as demandas processuais.
370-FI-001	Desalinhamento da correia desaguadora do filtro	5	5	4	100	1 - Alinhar a correia desaguadora; 2 - Verificar integridade e alinhamento dos rolos; 3 - Verificar integridade e alinhamento dos tambores.
370-FI-001	Distensionamento do tecido do filtro	5	5	4	100	1 - Tensionar ou substituir o tecido do filtro.
350-AL-002B	Queima do motor do alimentador vibratório	8	3	4	96	1 - Substituir motor queimado; 2 - Garantir a ausência da aplicação direta de água sobre a carcaça.
350-BP-002A	Travamento do rotor da bomba de polpa	8	5	2	80	1 - Desobstruir a bomba; 2 - Substituir rotor (se necessário).
350-BP-102B	Baixa eficiência da bomba de polpa	7	5	2	70	1 - Verificar obstruções na bomba; 2 - Verificar a potência e os comandos elétricos.
350-MO-001	Vazamentos nos parafusos do revestimento do moinho	5	3	4	60	1 - Substituir parafusos (se necessário); 2 - Garantir torque adequado ao modelo (conferir procedimento).
350-MO-101	Queima do motor auxiliar de acionamento do moinho	6	4	2	48	1 - Substituir motor queimado; 2 - Garantir a ausência da aplicação direta de água sobre a carcaça.
350-BP-002B	Desarme por superaquecimento da bomba de polpa	4	6	2	48	1 - Verificar obstruções na bomba; 2 - Verificar calibração dos sensores de temperatura.
350-CI-102	Falha no instrumento medidor de pressão (PSI)	4	3	2	24	1 - Substituir medidor de pressão; 2 - Garantir o isolamento e a proteção adequada ao novo instrumento.
350-MO-101	Inspeção do revestimento interno do moinho	1	1	1	1	Sem ações corretivas aplicáveis
350-MN-002A	Parada por falta de minério	1	1	1	1	Sem ações corretivas aplicáveis

Figura 14 – Quadro como imagem: Priorização do modos de falha.

Fonte: Autoria própria (2023).

4.2.5 Avaliação do Método

A presente metodologia, *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA), possui uma vasta aplicação no contexto da manutenção, sendo muito utilizada nos pilares de engenharia de manutenção, confiabilidade e gestão de ativos. A aplicação do método apresenta moderada complexidade, devido a necessidade de integrar diferentes equipes, de modo a compreender uma maior gama de perspectivas e possibilidades na avaliação e nas tratativas dos mais variados modos de falha.

De acordo com a AIAG (2008), a análise FMEA não deve ser encarada como uma ocorrência isolada, mas sim como um compromisso de médio e longo prazo, onde o propósito é assegurar que possíveis falhas sejam devidamente avaliadas e que medidas sejam implementadas para mitigar seus riscos. Essa visão corrobora com a complexidade da metodologia, mas é o que garante os resultados.

A forma como o método fora abordado no presente estudo representa uma aplicação simplificada, tendo em vista que todo o aparato inicial padrão de supor modos de falha, identificar potencialidades e assumir determinadas premissas, passou substituído pelo uso de um banco de dados de falhas já ocorridas. A AIAG (2008) define três possibilidades de aplicação do FMEA:

1. Novos designs, tecnologias ou processos:

O escopo do FMEA é desenvolver novo projeto, tecnologia ou processo completo.

2. Modificações no projeto ou processo existente:

O escopo do FMEA é modificar e melhorar projetos ou processos existentes.

3. Analisar projeto ou processo existente:

O escopo do FMEA é analisar ambiente, local de operação, aplicação de projeto ou processo existente.

Deste modo, a abordagem utilizada assumiu o perfil de analisar projeto ou processo existente, com foco em modos de falha ocorridos em uma planta de moagem de minério. No entanto, conforme supracitado, o escopo da presente pesquisa não engloba a definição das ações corretivas que, embora tenham sido listadas na planilha de priorização dos modos de falha (14), não são objetos de estudo. O foco da investigação deste método envolve a compreensão de suas possíveis entregas e benefícios que possam contribuir para o aumento da confiabilidade da área.

Sendo assim, é possível identificar na metodologia de *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA), uma grande desenvoltura em priorizar ocorrências a serem tratadas, se baseando em três principais variáveis: impacto produtivo (severidade), frequência da falha (ocorrência) e dificuldade de mapeamento (detecção). Todavia, a metodologia apresenta suas dificuldades, tais quais: complexidade de elaboração, ao demandar o envolvimento de uma equipe multidisciplinar e a variação da qualidade de análise devido à subjetividade inerente ao método que, apesar da presença de parâmetros tabelados, permite diferentes resultados em função da equipe desenvolvedora.

O FMEA, como método, possibilita o aumento da confiabilidade através da relação discutida no referencial teórico (2.7), onde " $R(t) = e^{(-\lambda t)}$ ", o que induz ao conceito de que, com a redução da incidência de paradas de produção para manutenção, ocorrerá a redução da taxa de falhas e, algebricamente, o aumento da confiabilidade em função do tempo.

Por fim, é importante destacar que a presente metodologia está integrada aos conceitos do *Lean Six Sigma*, e está sendo utilizada com a função de "Analyze" na visão de melhoria contínua presente no DMAIC (*Define, Measure, Analyze, Improve, Control*). Deste modo, credita-se o mecanismo como um ciclo para aumento de produtividade, eficiência e, principalmente, de confiabilidade, através da identificação e priorização dos tópicos de maior criticidade e impacto produtivo.

4.3 Perfil de Perdas

Para a definição do Perfil de Perdas, foi necessária a utilização de *software*. Nesse caso, a ferramenta permitiu o tratamento de dados brutos e a elaboração de gráficos, tudo isso através do conceito de *business intelligence*. Para tal, fora escolhido *software* de análise de dados e geração de *dashboards* da *Microsoft*, o *Power BI*. Tal processo, por ser computacional, demanda a execução de menos tarefas, no entanto, permite múltiplas possibilidades para a análise dos dados - de forma numérica - sendo estes:

- *Upload* da base de dados;
- Desenvolvimento gráfico;
- Análises e definição de prioridades.

4.3.1 Upload de Dados

Para processamento dos dados, via *Power BI*, serão novamente utilizados os dados contidos na base de dados de paradas de produção da moagem, referente ao primeiro semestre de 2023. No entanto, para a presente aplicação, o banco será analisado ainda com as informações brutas, sem tratamento prévio ao *software*. Desta forma, todo o tratamento de informações deverá ocorrer de forma interna ao *Power BI*. A figura a seguir (15) apresenta o resumo da base bruta:

Setor	Equipamento	Início	Termino	Duracao	Causa	Observações	Tipo	Turno	Planta	Área
Mecânica	350-MO-001	13/01/2023 21:00	14/01/2023 04:00	7	Quebrado	Redutor do moinho 01 apresentou fumaça e desalinhamento	DF	B	Moagem 1	BMC
Mecânica	350-MO-101	13/01/2023 21:00	14/01/2023 04:00	7	Quebrado	Redutor do moinho 01 apresentou fumaça e desalinhamento	DF	B	Moagem 2	BMC
Mecânica	350-MO-001	14/01/2023 04:00	14/01/2023 15:41	11,7	Quebrado	Redutor do moinho 01 apresentou fumaça e desalinhamento	DF	A	Moagem 1	BMC
Mecânica	350-MO-101	14/01/2023 04:00	14/01/2023 16:00	12	Quebrado	Redutor do moinho 01 apresentou fumaça e desalinhamento	DF	A	Moagem 2	BMC
Mecânica	350-TQ-004	14/01/2023 15:55	14/01/2023 16:00	0,1	Vazamento	área parada devido vazamento na janela do 350 TQ-04 e dese	DF	A	Moagem 1	BMC
Mecânica	350-TQ-004	14/01/2023 16:00	14/01/2023 18:14	2,2	Vazamento	Vazamento na caixa de descarga do moinho.	DF	C	Moagem 1	BMC
Mecânica	350-MO-101	14/01/2023 16:00	14/01/2023 20:59	5	Outros	MO-101 sem o rolamento do redutor.	DF	C	Moagem 2	BMC
Mecânica	370-FI-001	14/01/2023 18:41	14/01/2023 20:53	2,2	Desalinhamento	Desalinhamento da correia desaguadora.	DF	C	Moagem 1	BMC
Mecânica	350-MO-101	14/01/2023 21:00	15/01/2023 04:00	7	Outros	MO-101 sem o rolamento do redutor.	DF	C	Moagem 2	BMC
Mecânica	350-MO-101	15/01/2023 04:00	15/01/2023 16:00	12	Outros	MO-101 sem o rolamento do redutor.	DF	A	Moagem 2	BMC
Mecânica	350-MO-101	15/01/2023 16:00	15/01/2023 20:59	5	Outros	MO-101 sem o rolamento do redutor.	DF	C	Moagem 2	BMC
Mecânica	370-FI-001	15/01/2023 18:58	15/01/2023 20:27	1,5	Quebrado	Quebra da correia de desgaste do filtro.	DF	C	Moagem 1	BMC
Mecânica	350-MO-101	15/01/2023 21:00	16/01/2023 04:00	7	Outros	MO-101 sem o rolamento do redutor.	DF	C	Moagem 2	BMC
Mecânica	350-MN-002B	16/01/2023 04:00	16/01/2023 16:00	12	Outros	MO-101 sem o rolamento do redutor.	DF	D	Moagem 2	BMC
Mecânica	350-MN-002B	16/01/2023 16:00	16/01/2023 20:59	5	Outros	MO-101 sem o rolamento do redutor.	DF	A	Moagem 2	BMC
Mecânica	350-MN-002B	16/01/2023 21:00	17/01/2023 04:00	7	Outros	MO-101 sem o rolamento do redutor.	DF	A	Moagem 2	BMC
Mecânica	350-MN-002B	17/01/2023 04:00	17/01/2023 16:00	12	Outros	MO-101 sem o rolamento do redutor.	DF	D	Moagem 2	BMC
Mecânica	350-MN-002B	17/01/2023 16:00	17/01/2023 20:59	5	Outros	MO-101 sem o rolamento do redutor.	DF	A	Moagem 2	BMC
Mecânica	350-MN-002B	17/01/2023 21:00	18/01/2023 04:00	7	Outros	MO-101 sem o rolamento do redutor.	DF	A	Moagem 2	BMC
Elétrica	350-MO-001	19/01/2023 17:50	19/01/2023 17:56	0,1	Falha de equip.	Sem alimentação devido MO-001 ter parado com bloqueio no	DF	D	Moagem 1	BMC
Mecânica	350-MO-101	20/01/2023 04:00	20/01/2023 16:00	12	Inspeção	Área parada devido inspeção no revestimento.	DF	C	Moagem 2	BMC
Mecânica	350-BP-001B	22/01/2023 00:48	22/01/2023 01:15	0,5	Pressão Baixa	Sem alimentação para inversão da BP-001B pela BP-001A dev	DF	B	Moagem 1	BMC
Instrumentação	350-TR-006	23/01/2023 07:02	23/01/2023 07:18	0,3	Aferição	área parada para a instrumentação realizar aferição na balan	DF	A	Moagem 1	BMC
Instrumentação	350-TR-006	23/01/2023 06:22	23/01/2023 07:34	1,2	Aferição	área para realizar aferição na balança de alimentação.	DF	A	Moagem 1	BMC
Mecânica	370-FI-001	25/01/2023 09:18	25/01/2023 09:41	1,1	Tensionamento	parada para tensionamento do tecido do FI-001 e inversão de	DF	D	Moagem 1	BMC
Mecânica	350-XV-004	25/01/2023 19:27	25/01/2023 20:59	1,7	Vazamento	área parada para a manutenção sanar vazamento na 350 XV-	DF	A	Moagem 1	BMC
Mecânica	350-MN-002B	25/01/2023 19:17	25/01/2023 20:59	1,7	Vazamento	área parada para a manutenção sanar vazamento na 350 XV-	DF	A	Moagem 2	BMC
Mecânica	350-XV-004	25/01/2023 21:00	25/01/2023 21:20	0,3	Vazamento	área parada para a manutenção sanar vazamento na 350 XV-	DF	A	Moagem 1	BMC
Mecânica	350-MN-002B	25/01/2023 21:00	25/01/2023 21:20	0,3	Vazamento	área parada para a manutenção sanar vazamento na 350 XV-	DF	A	Moagem 2	BMC
Elétrica	350-MO-101	26/01/2023 02:58	26/01/2023 03:12	0,2	Falha de equip.	área parada devido defeito no reostato.	DF	A	Moagem 2	BMC
Mecânica	350-XV-003	26/01/2023 20:01	26/01/2023 20:59	1	Vazamento	parada devido vazamento no XV-03 e XV-04.	DF	D	Moagem 1	BMC
Mecânica	350-XV-003	26/01/2023 20:01	26/01/2023 20:59	1	Vazamento	parada devido vazamento no XV-03 e XV-04.	DF	D	Moagem 2	BMC
Mecânica	350-XV-003	26/01/2023 21:00	26/01/2023 22:19	1,3	Vazamento	parada devido vazamento no XV-03 e XV-04.	DF	D	Moagem 1	BMC
Mecânica	350-XV-003	26/01/2023 21:00	26/01/2023 22:19	1,3	Vazamento	parada devido quebra do parafusos do acoplamento elástico	DF	D	Moagem 2	BMC
Mecânica	350-MO-101	27/01/2023 07:45	27/01/2023 09:48	2,1	Outros	Avaliação de ruído anormal no motor principal do moinho e v	DF	B	Moagem 2	BMC
Mecânica	350-XV-003	27/01/2023 08:39	27/01/2023 09:48	1,2	Vazamento	Vazamento	DF	B	Moagem 1	BMC
Mecânica	350-MO-101	27/01/2023 12:20	27/01/2023 16:00	3,7	Outros	Parado para manutenção atuar no redutor do moinho	DF	B	Moagem 2	BMC
Mecânica	350-MO-101	27/01/2023 16:00	27/01/2023 21:00	5	Outros	Parado para manutenção atuar no redutor do moinho	DF	D	Moagem 2	BMC
Mecânica	350-MO-101	27/01/2023 21:00	28/01/2023 04:00	7	Outros	Parado para manutenção atuar no redutor do moinho	DF	D	Moagem 2	BMC
Mecânica	350-MO-101	28/01/2023 04:00	28/01/2023 16:00	12	Outros	Manutenção no redutor do moinho	DF	C	Moagem 2	BMC
Mecânica	350-BP-001A	28/01/2023 13:27	28/01/2023 13:43	0,3	Vazamento	Vazamento na gaxeta da BP-001A.	DF	C	Moagem 1	BMC
Mecânica	350-MO-101	28/01/2023 16:00	28/01/2023 20:59	5	Outros	Manutenção no redutor do moinho	DF	B	Moagem 2	BMC
Mecânica	350-MO-101	28/01/2023 21:00	29/01/2023 00:00	3	Outros	Manutenção no redutor do moinho	DF	B	Moagem 2	BMC
Instrumentação	350-TR-006	29/01/2023 19:34	29/01/2023 19:50	0,3	Aferição	Aferição da balança de alimentação da TR-006.	DF	B	Moagem 1	BMC
Mecânica	350-MN-002A	31/01/2023 06:10	31/01/2023 11:43	5,6	Falta de minério	área parada devido falta de minério.	DF	A	Moagem 1	BMC
Elétrica	350-BA-002A	03/02/2023 12:59	03/02/2023 13:09	0,2	Defeito na relé	Desarme por sobre temperatura no ar interno da 350-BA-002	DF	B	Moagem 1	BMC
Elétrica	350-MN-002A	04/02/2023 10:22	04/02/2023 12:30	2,1	Sem energia	Queda de energia na planta.	DF	B	Moagem 1	BMC
Elétrica	350-BA-002A	05/02/2023 14:05	05/02/2023 14:46	0,7	Falha de equip.	sem alimentação devido desarme das 350-BA002A/B com ind	DF	C	Moagem 1	BMC
Elétrica	350-BA-002A	05/02/2023 14:05	05/02/2023 14:46	0,7	Falha de equip.	sem alimentação devido desarme das 350-BA002A/B com ind	DF	C	Moagem 2	BMC
Instrumentação	350-MN-002B	08/02/2023 09:20	08/02/2023 09:43	0,4	Falha de sensor	área parada devido falha no sistema de graxa no 350 moinho	DF	A	Moagem 2	BMC
Mecânica	350-MO-101	11/02/2023 00:19	11/02/2023 04:00	3,5	Falha de equip.	área parada devido falha de graxa no sistema de lubrificação.	DF	A	Moagem 2	BMC
Mecânica	350-MO-101	11/02/2023 04:00	11/02/2023 15:18	11,3	Falha de equip.	Falha no sistema de graxa do 350-MO-101.	DF	B	Moagem 2	BMC
Mecânica	370-FI-001	12/02/2023 04:48	12/02/2023 09:16	4,5	Substituição	Ajuste no eixo do rolo formador de torta do filtro e reposiçã	DF	B	Moagem 1	BMC
Mecânica	350-MO-101	12/02/2023 04:48	12/02/2023 09:16	4,5	Substituição	Ajuste no eixo do rolo formador de torta do filtro e reposiçã	DF	B	Moagem 2	BMC

Figura 15 – Quadro como imagem: Resumo da base de dados bruta para *upload*.

Fonte: Autoria própria (2023).

4.3.2 Desenvolvimento Gráfico

O desenvolvimento de gráficos, no *Power BI*, permite o uso de diversas ferramentas. No entanto, conforme definido na Metodologia (3.1.1.2), o conceito de Pareto será utilizado para definição do Perfil de Perdas da moagem. Durante o desenvolvimento, apesar das diversas possibilidades nativas do *software*, foi realizada a importação de um visual externo, produzido pela "sio2Graphs", e realizada sua inclusão na seção de visuais gráficos do *Power BI*. A figura a seguir (16) apresenta o gráfico utilizado:

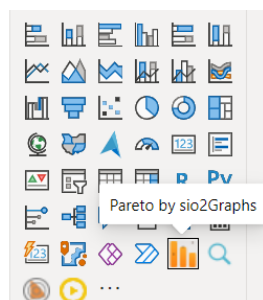


Figura 16 – Modelo de visual gráfico utilizado para desenvolvimento do Pareto.

Fonte: A autoria própria (2023).

O visual importado ao *Power BI* possui métricas semelhantes aos visuais nativos e, com isso, permite fácil configuração. Deste modo, a seção a seguir exibirá os resultados obtidos e o respectivo Perfil de Perdas da área, para equipamentos e modos de falha.

4.3.3 Análises e Priorização

Os gráficos a seguir (17 e 18), produzidos através de *business intelligence*, abordam o Perfil de Perdas da moagem para o primeiro semestre de 2023:

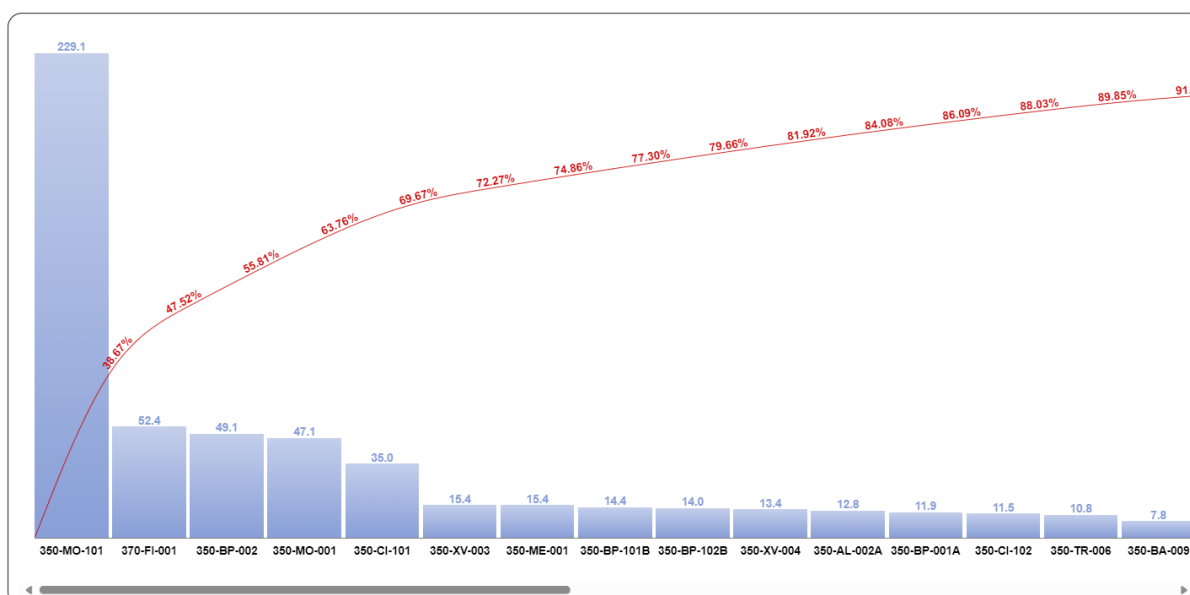


Figura 17 – Perfil de perdas para equipamentos.

Fonte: A autoria própria (2023).

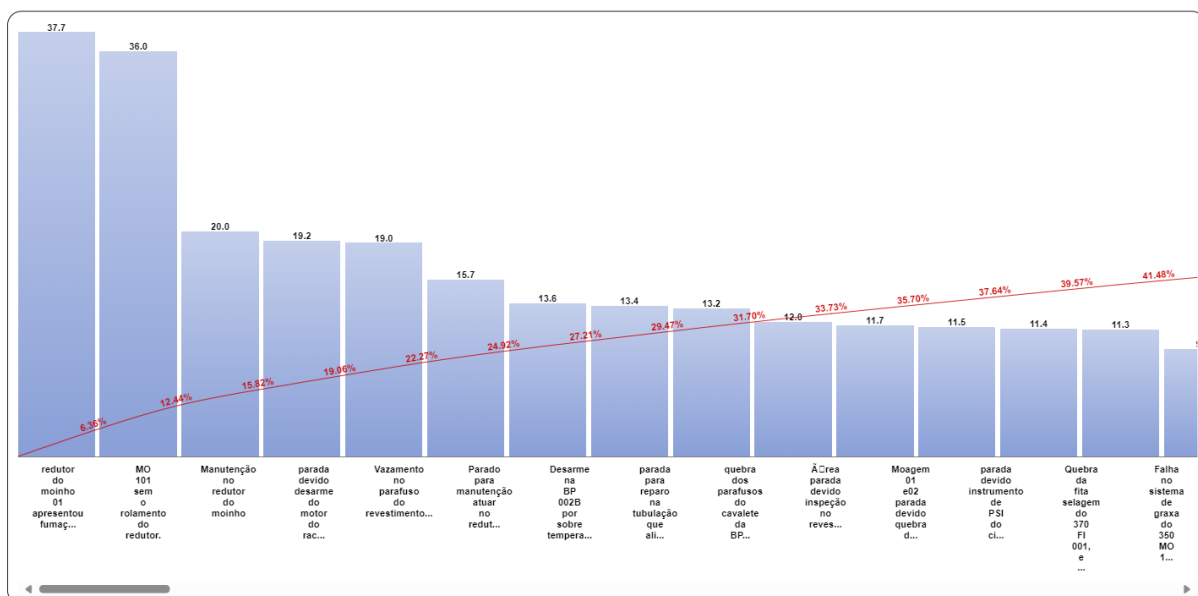


Figura 18 – Perfil de perdas para modos de falha.

Fonte: Autoria própria (2023).

Como observado, o Perfil de Perdas da moagem foi segregado em função de duas variáveis: equipamentos e modos de falha. Sendo assim, o gráfico (17) expressa os equipamentos de maior criticidade, sendo estes os que obtiveram maior somatório de horas sem produzir, como é o caso do moinho secundário (350-MO-101), filtro de correias (370-FI-001), bomba de polpa de alimentação da bacia de material não magnético (350-BP-002), moinho primário (350-MO-001) e, em quinto lugar, o hidrocyclone primário (350-CI-101). O gráfico (18), por sua vez, apresenta os modos de falha de maior criticidade, sendo possível observar eventos como o superaquecimento do reductor do moinho secundário, o tratamento do rolamento do reductor do moinho secundário, desarmes elétricos na bomba de polpa de alimentação da bacia de material não magnético (350-BP-002), dentre outros distinto eventos, ambos elencados em função da quantidade de horas de parada de produção.

Como informado anteriormente, alguns dos registros, por excederem o horário limite de turno, possuem mais de um lançamento, embora representem um mesmo evento. Isso proporciona as distintas descrições para uma mesma ocorrência, exigindo com que seja necessário novos ajustes, ainda mais finos, identificando cronologicamente os lançamentos que representam um mesmo evento. Todavia, o escopo da presente pesquisa se concentra em compreender as possíveis entregas e benefícios do método, que possam corroborar com o aumento da confiabilidade da moagem. O mesmo ocorre para a definição das tratativas, ou planos de ação, que devem ser gerados após o desenvolvimento do perfil de perdas e que, na presente pesquisa, se compreende fora dos limites do campo de estudo. Por fim, sugere-se, ao se utilizar ferramentas de *business intelligence*, que os dados sejam previamente tratados, de modo a se obter padronização no registro dos eventos e até mesmo de tags de identificação de equipamentos. Seguindo recomendações supracitadas os perfis de perda passarão a obter cada vez mais acurácia em converter os números no real perfil da planta.

4.3.4 Avaliação do Método

A presente metodologia possui grande presença no controle da manutenção e, desta forma, vem se tornando um conceito cada vez mais participativo no apoio à tomadas de decisão por parte das gerências de manutenção. Barrientos et al. (2022) complementa que a utilização da técnica de análise de Pareto é valiosa quando se trata de tomar decisões estratégicas, permitindo que os responsáveis pela gestão determinem sua influência no desempenho, otimizem a alocação de recursos e economizem tempo, evitando problemas. Como observado, o método possui abordagem quantitativa, se baseando em bases de dados e, por vezes, fazendo uso de ferramentas de *business intelligence*. Desta forma, permite a realização de análises através de dados numéricos, o que pode fornecer ao método uma maior acurácia em relação às informações que serão utilizadas para tomada de decisão.

No entanto, é possível observar as fragilidades contidas no método e, de mesmo modo, as formas de se contornar tais pontos fracos. A principal dificuldade do método surge em detrimento do banco de dados, afinal, se a base fornecida não possuir os tratamentos mínimos necessários, o resultado gráfico entregue pelo Perfil de Perdas não trará, em essência, o real cenário do processo produtivo. Deste modo, reiterando as recomendações feitas na seção anterior, é de extrema importância que a base de dados seja tratada, identificando despadronização de tags e de lançamentos para um mesmo evento. A segunda dificuldade encontrada para o desenvolvimento do Perfil de Perdas, com o método atual, se relaciona com o *software*. Afinal, a utilização do *Power BI*, ou qualquer outro *software* de *business intelligence*, demanda o conhecimento prévio da ferramenta. Adicionalmente, para aplicação de análises mais profundas e complexas, os requisitos para desenvolvimento se tornam ainda mais exigentes, demandando o conhecimento prévio em linguagens de programação, de modo a definir melhores parâmetros ou utilizar diferentes estratégias na análise dos dados. No entanto, de modo similar a primeira dificuldade, o problema é contornável e os materiais para utilização de *business intelligence* vem se tornando cada vez mais comuns, principalmente com a ascensão das inteligências artificiais.

Apesar da discussão sobre a importância do método, da sua forma de abordar os dados e das suas dificuldades, o Perfil de Perdas, por meio do princípio de Pareto, permite a identificação dos principais gargalos do processo produtivo. Durante a avaliação dos modos de falha da moagem, foi possível identificar os principais equipamentos indisponíveis e o percentual do seu impacto mediante os demais equipamentos. O mesmo ocorreu para os modos de falha que, apesar das dificuldades com padronização de ocorrências, conseguiu apontar para os modos de falhas mais recorrentes e críticos. Por fim, pode-se observar a priorização dos modos de falhas e equipamentos, embora não tenham sido gerados planos de ação após a análise dos dados - por fugir do escopo da presente pesquisa. A priorização ocorre de forma natural, através do próprio conceito de Pareto, utilizado pelo Perfil de Perdas. Sendo assim, ao proporcionar análise e priorização dos modos de falha, o método pode ser entendido como direto para o aumento da confiabilidade, através da redução da taxa de falhas.

4.4 5 Porquês

Para o desenvolvimento do 5 Porquês, se torna necessário o *feeling* e a perspectiva de pessoas próximas aos eventos, comumente atribuídas à operadores, mecânicos, técnicos e supervisores de área. Desta forma, se tornou inevitável a elaboração de questionários e à visita ao chão de fábrica (Gemba) para realizar o questionamento amistoso aos colaboradores que vivenciam diariamente os modos de falha presentes na moagem. Deste modo, os seguintes passos foram executados:

- Tratamento e classificação do banco de dados;
- Definição das falhas a serem analisadas;
- Análises e questionamentos.

4.4.1 Tratamento e Classificação dos Dados

Devido o fato da base de dados ser compartilhada entre todos os métodos examinados, os mesmos modos de falha tratados e analisados na figura (12) foram utilizados para a investigação no método dos 5 Porquês. As informações também são provenientes do tratamento das 42 linhas filtradas e classificadas na figura (11), baseado no banco de dados de paradas de produção. Desta forma, a seção seguinte abordará os modos de falha definidos para serem analisados.

4.4.2 Definição do Escopo

De modo a tornar mais eficiente o processo de investigação, via 5 Porquês, foram utilizados alguns dos principais modos de falha abordados durante a aplicação do FMEA (4.2.2). A figura a seguir (19) apresenta as três ocorrências definidas para análise e aplicação do método:

1	350-MO-101	Superaquecimento no redutor do moinho
2	370-FI-001	Quebra da fita de selagem do filtro
3	350-BP-002A	Vazamento na linha de recalque da bomba de polpa

Figura 19 – Quadro como imagem: Definição dos modos de falha para aplicação do 5 Porquês.

Fonte: Autoria própria (2023).

Deste modo, os itens elencados para a devida análise e aplicação dos questionários - com colaboradores do chão de fábrica - serão remanejados para a planilha dos 5 Porquês e, desta forma, serão realizados os questionamentos. Vale ressaltar que, foram escolhidos: um técnico de manutenção, um supervisor de manutenção e um operador de área para a aplicação dos questionário. Após a coleta das informações, uma única planilha fora alimentada, contendo as informações de todos os entrevistados e suas respectivas visões sobre as causas raízes das ocorrências abordadas.

4.4.3 Análises e Questionamentos

Durante a aplicação do método, em chão de fábrica, os principais modos de falha foram apresentados aos entrevistados e, em seguida, realizados os sucessivos questionamentos em busca da causa raiz de cada ocorrência, com base na expertise e na vivência dos entrevistados. As figuras a seguir (20, 21 e 22) abordam as perspectivas de cada colaborador para os três modos de falha elencados.

- Técnico de Manutenção:

Técnico de Manutenção						
	Modo de Falha	1 - Porquê?	2 - Porquê?	3 - Porquê?	4 - Porquê?	5 - Porquê?
350-MO-101	Superaquecimento no redutor do moinho	Desalinhamento entre o motor, redutor e o conjunto de acionamento	Alinhamento realizado incorretamente	Alinhamento do acoplamento do redutor/motor realizado antes do acoplamento do redutor/coroa de acionamento	Falta de conhecimento por parte dos executantes	Ausência de treinamentos específicos para alinhamento de máquinas de grande porte
370-FI-001	Quebra da fita de selagem do filtro	Fita de selagem desgastada ou ressecada	Montagem inadequada da fita de selagem	Uso de fitas de selagem de baixa qualidade	Para redução dos custos de manutenção/operação	Alteração do fornecedor realizada pelo setor de suprimentos
350-BP-002A	Vazamento na linha de recalque da bomba de polpa	Excesso de emendas nas tubulações	Tubulações com desgaste acentuado	Corrosão da tubulação através do material	Material com elevada abrasividade degradando a tubulação	Material da tubulação não atende às demandas do processo

Figura 20 – Quadro como imagem: Questionário de 5 porquês - técnico de manutenção.

Fonte: Autoria própria (2023).

- Supervisor de Manutenção:

Supervisor de Manutenção						
	Modo de Falha	1 - Porquê?	2 - Porquê?	3 - Porquê?	4 - Porquê?	5 - Porquê?
350-MO-101	Superaquecimento no redutor do moinho	Baixo arrefecimento no sistema de lubrificação	O óleo não perde o calor necessário	Não existe radiador ou trocador de calor	Sistema de lubrificação não é forçado	Ausência de bombas de óleo no sistema de lubrificação
370-FI-001	Quebra da fita de selagem do filtro	Desgaste rápido da fita de selagem	Incompatibilidade com o filtro de correias	Material com qualidade inferior	Não se utiliza a fita original recomendada pelo fabricante	Política de redução de custos do setor de suprimentos
350-BP-002A	Vazamento na linha de recalque da bomba de polpa	Polpa corrói o material da tubulação rapidamente	Material da polpa desgasta a tubulação	Material da tubulação com dureza menor do que a da polpa de minério	Tubulação polimérica sem revestimento interno	Especificação incorreta para os materiais da tubulação

Figura 21 – Quadro como imagem: Questionário de 5 porquês - supervisor de manutenção.

Fonte: Autoria própria (2023).

- Operador de Área:

Operador de Área						
	Modo de Falha	1 - Porquê?	2 - Porquê?	3 - Porquê?	4 - Porquê?	5 - Porquê?
350-MO-101	Superaquecimento no redutor do moinho	Vazamento de óleo pela tampa do redutor	Vedação ruim nos vãos da tampa do redutor	Aparente uso de silicone para vedação	Material utilizado pela equipe de subconjunto durante o fechamento do redutor	Devido manutenção realizada anteriormente no rolamento do redutor
370-FI-001	Quebra da fita de selagem do filtro	A fita de selagem se desgasta muito rápido	O filtro de correias não funciona bem com a fita	O material não aparenta ser bom	Não se utiliza mais a fita original do equipamento	Economia na compra dos materiais
350-BP-002A	Vazamento na linha de recalque da bomba de polpa	A polpa estraga a tubulação muito rápido	O material da polpa desgasta a tubulação	O material da tubulação é mais fraco do que o material da polpa	A tubulação não tem revestimento	Material da tubulação não é o adequado

Figura 22 – Quadro como imagem: Questionário de 5 porquês - operador de área.

Fonte: Autoria própria (2023).

4.4.4 Avaliação do Método

A presente metodologia do 5 Porquês, é utilizado em diversos cenários, não se restringindo ao cenário de análise de modos de falha. Inclusive, a abordagem surge com esta finalidade a partir do conceito presente no *Lean Six Sigma* de redução de desperdícios. Deste modo, os 5 porquês surgem para auxiliar na análise da causa raiz para os mais distintos modos de falha. Sendo assim, Neto (2022) afirma que "os 5 porquês são utilizados para investigar causas, de forma a se aprofundar e encontrar a causa raiz por traz do problema. Ela funciona através do questionamento de uma causa encontrada para um problema".

A metodologia permite a investigação continuada a respeito de um determinado modo de falha, de modo a repetir as perguntas até que se encontre a resposta para a causa raiz do problema. O método, embora muito simples, permite a análise das ocorrências através do *feeling* e da vivência das pessoas envolvidas com o processo. Como observado, o método está sujeito à subjetividade de cada entrevistado, o que se destaca como uma fragilidade do método, já que, por ser um método qualitativo, está a mercer de interpretações erradas ou visões incorretas sobre a falha em questão. No entanto, a presença de colaboradores qualificados e treinados quanto a operação e manutenção dos equipamentos, permite o contorno da situação e aumenta a confiança nas informações coletadas pelo método.

É fundamental para o presente método a existência de um banco de dados com as informações de parada de área, de modo a permitir a identificação de quais modos de falha passarão pela investigação intrínseca ao método. E, embora a presente abordagem tenha definido três objetos de estudo, o 5 Porquês pode ser aplicado para uma vasta quantidade de ocorrências. Por fim, ao permitir a identificação de causas raiz e, desta forma, proporcionar a redução da taxa de falhas, o método pode ser entendido como direto para o aumento da confiabilidade.

4.5 Reliability Centered Maintenance (RCM)

De forma análoga ao desenvolvimento do *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA), a aplicação do *Reliability Centered Maintenance* (RCM) demanda a realização de uma reunião multidisciplinar. No presente caso, foram envolvidos os mesmos colaboradores dos times dos times descritos na seção do FMEA (4.2). Deste modo, para a execução do método, os seguintes passos foram seguidos:

- Tratamento e classificação do banco de dados;
- Definição das falhas a serem analisadas;
- Análises e definições.

4.5.1 Tratamento e Classificação dos Dados

De modo similar ao ocorrido com a seção do 5 Porquês (4.4), os mesmos modos de falha tratados e analisados na figura (12), da seção de FMEA (4.2), foram utilizados para o desenvolvimento do RCM. As informações utilizadas também provém do tratamento das 42 linhas filtradas e classificadas da figura (11). Desta forma, a seção seguinte abordará os modos de falha definidos para serem analisados, via RCM.

4.5.2 Definição do Escopo

Os seguintes modos de falha (23) foram definidos para a aplicação do RCM:

1	350-AL-002B	Queima do motor do alimentador vibratório
2	350-BP-002A	Vazamento na linha de recalque da bomba de polpa
3	350-BP-002A	Travamento do rotor da bomba de polpa
4	350-BP-002B	Desarme por superaquecimento da bomba de polpa
5	350-BP-101A	Vazamento na linha de recalque da bomba de polpa
6	350-BP-102B	Baixa eficiência da bomba de polpa
7	350-CI-102	Falha no instrumento medidor de pressão (PSI)
8	350-MO-001	Vazamentos nos parafusos do revestimento do moinho
9	350-MO-101	Superaquecimento no redutor do moinho
10	350-MO-101	Queima do motor auxiliar de acionamento do moinho
11	370-FI-001	Desalinhamento da correia desaguadora do filtro
12	370-FI-001	Distensionamento do tecido do filtro
13	370-FI-001	Quebra da fita de selagem do filtro

Figura 23 – Quadro como imagem: Definição dos modos de falha para aplicação do do RCM.

Fonte: Autoria própria (2023).

Deste modo, os itens elencados para análise e aplicação do RCM serão remanejados para a planilha (9) e, desta forma, serão realizados os procedimentos para a execução do método. É de extrema importância ratificar que, escopo da pesquisa não englobará a definição das ações e, muito menos, as melhores formas de se desenvolver *workshops* ou montagem de equipes para se aplicar o RCM.

4.5.3 Análises e Definições

Durante a aplicação do método, reunião multidisciplinar, os principais modos de falha foram apresentados aos colaboradores e, em seguida, classificados conforme a ordem lógica disposta na planilha (9). A figura a seguir (24) aborda os resultados obtidos para o RCM, conforme os modos de falhas elencados no escopo (23):

EQUIPAMENTO	MODO DE FALHA	MTTR	CAUSA DA FALHA	EFEITO DA FALHA	TRATATIVA	TEMPO	EXECUTANTES	HH	PLANO	PERIODICIDADE
350-AL-002B (Alimentador vibratório do moinho primário)	Queima do motor do alimentador vibratório	5 h	Sobrecarga elétrica	Paralisação parcial da alimentação de material no moinho primário	Implementar rotina de inspeção dos sistemas de proteção elétrica da moagem	3	1	3	Inspeção elétrica	Semanal
		5 h	Exposição direta de água		Treinar os operadores quanto os procedimentos ideais para limpeza	-	-	-	-	Bienal
350-BP-002A (Bomba de alimentação da bacia de material não magnético)	Vazamento na linha de recalque da bomba de polpa	2 h	Desgaste da tubulação	Contaminação do meio ambiente	Implementar rotina de inspeção de vazamento nas tubulações da moagem	1	1	1	Inspeção mecânica	Diário
	Travamento do rotor da bomba de polpa	3 h	Obstrução ou presença de corpo estranho	Queima de motor e paralisação parcial da alimentação da bacia de rejeito de material não-magnético	Implementar rotina de inspeção preditiva (vibração) para identificar presença de corpos estranhos	0,2	1	0,2	Inspeção preditiva	Diário
350-BP-002B (Bomba de alimentação da bacia de material não magnético)	Desarme por superaquecimento da bomba de polpa	2 h	Obstrução ou presença de corpo estranho	Paralisação parcial da alimentação da bacia de rejeito de material não-magnético	Implementar rotina de inspeção preditiva (vibração) para identificar presença de corpos estranhos	0,2	1	0,2	Inspeção preditiva	Diário
		1 h	Sobrecarga na bomba		Implementar rotina de avaliar a densidade e a viscosidade do material direcionado ao rejeito	0,5	1	0,5	Operacional	Diário
350-BP-101A (Bomba de alimentação do hidrociclone)	Vazamento na linha de recalque da bomba de polpa	2 h	Desgaste da tubulação	Contaminação do meio ambiente	Implementar rotina de inspeção de vazamento nas tubulações da moagem	1	1	1	Inspeção mecânica	Diário
350-BP-102B (Bomba de alimentação dos separadores magnéticos)	Baixa eficiência da bomba de polpa	5 h	Desgaste do rotor	Paralisação parcial da alimentação dos separadores magnéticos	Implementar rotina de avaliar e substituir rotos (se necessário)	5	1	5	Preventiva mecânica	Trimestral
		2 h	Presença de corpo estranho		Implementar rotina de inspeção preditiva (vibração) para identificar presença de corpos estranhos	0,2	1	0,2	Inspeção preditiva	Diário
		1 h	Sobrecarga na bomba		Implementar rotina de avaliar a densidade e a viscosidade do material a ser concentrado	0,5	1	0,5	Operacional	Diário
350-CI-102 (Hidrociclone secundário)	Falha no instrumento medidor de pressão (PSI)	2 h	Movimentação inesperada ou desgaste do instrumento	Medição incorreta de pressão	Implementar rotina de inspeção no instrumentos da moagem	3	1	3	Inspeção elétrica	Semanal
350-MO-001 (Moinho primário)	Vazamentos nos parafusos do revestimento do moinho	2 h	Aperto insuficiente dos parafusos	Contaminação do meio ambiente e perda de material	Treinar os mecânicos quanto o procedimento ideal de torque de parafusos	-	-	-	-	Semestral
350-MO-101 (Moinho secundário)	Superaquecimento no redutor do moinho	12 h	Desalinhamento	Perda da função primária do moinho secundário	Treinar os mecânicos quanto o procedimento correto de alinhamento de redutores	-	-	-	-	Anual
		5 h	Lubrificação inadequada		Implementar rotina de verificação do sistema de lubrificação do redutor do moinho	1	1	1	Inspeção mecânica	Mensal
	Queima do motor auxiliar de acionamento do moinho	5 h	Sobrecarga elétrica	Paralisação parcial da alimentação de material no moinho primário	Implementar rotina de inspeção dos sistemas de proteção elétrica da moagem	3	1	3	Inspeção elétrica	Semanal
		5 h	Exposição direta de água		Treinar os operadores quanto os procedimentos ideais para limpeza	-	-	-	-	Bienal
370-FI-001 (Filtro horizontal de correias)	Desalinhamento da correia desaguadora do filtro	3 h	Desgaste no tambor de acionamento ou retorno	Rompimento da emenda	Implementar rotina de verificação do alinhamento da correia e do desgaste dos tambores	0,5	1	0,5	Inspeção mecânica	Semanal
	Distensionamento do tecido do filtro	4 h	Desgaste do tecido do filtro	Perda parcial da função primária do filtro de correias	Implementar rotina de verificação do conjunto esticador do tecido	0,5	1	0,5	Inspeção mecânica	Semanal
	Quebra da fita de selagem do filtro	2 h	Fita desgastada, tensão inadequada	Perda parcial da função secundária do filtro de correias	Implementar rotina de verificação da integridade da fita de selagem	0,5	1	0,5	Inspeção mecânica	Semanal

Figura 24 – Quadro como imagem: Aplicação do RCM.

Fonte: Autoria própria (2023).

4.5.4 Avaliação do Método

A presente metodologia, *Reliability Centered Maintenance* (RCM), possui vasta aplicação no campo das engenharias de manutenção e confiabilidade. O método surge, de acordo com Madureira (2022), de modo a viabilizar a melhorias em planos de manutenção preventiva, com base na análise dos potenciais problemas dos equipamentos e na gravidade de suas consequências, determinando as atividades e as periodicidades, conforme as discussões realizadas na aplicação da metodologia.

Desta forma, a partir da filtragem e classificação, os modos de falha que obtiveram tempo de parada maior do que cinco horas - em todo o primeiro semestre de 2023 - foram submetidos à manutenção centrada em qualidade, RCM, de forma a gerar tratativas pró-ativas para as principais perdas registradas para o processo da moagem no intervalo citado. Sendo assim, a presença de um banco de dados contendo os registros de áreas de interrupção é um requisito essencial para o método atual, a fim de viabilizar a detecção dos modos de falha que serão objeto de investigação intrínseca de acordo com o método.

No entanto, mais uma vez, é importante considerar que as tomadas de decisão derivadas da aplicação do RCM não fazem parte das disposições da presente pesquisa, assim como o estudo das melhores formas de se definir como em função de cada modo de falha. Apesar das informações estarem dispostas na figura (24), o atual estudo busca o foco em: entender os possíveis resultados entregues pela metodologia, de modo a se obter o aumento de confiabilidade em um processo produtivo, no caso, a moagem.

Apesar do desenvolvimento complexo, o método realiza a análise do cenário em que o cada equipamento está disposto, ou mesmo a sua finalidade, interpreta o motivo ocasionador da falha e o respectivo efeito para a produção. Desta forma, o grupo analisador define, em conjunto, quais as melhores medidas a serem implementadas, de forma pró-ativa, de modo a mitigar os modos de falha, evitando reincidências. Como complemento, são definidos parâmetros básicos, como o produto homem-hora(HH) e a periodicidade de cada ação, de modo a orientar o planejamento e a programação de manutenção os pontos a serem incluídos e detalhados na rotina de preventivas.

O método é direcionado, intrínsecamente, a conduzir o aumento da confiabilidade. Para isso, deve-se entender confiabilidade como a relação entre a taxa de falhas e o tempo, abordados na seção (2.7) como a seguinte função exponencial de decaimento: " $R(t) = e^{(-\lambda t)}$ ". Sendo assim, o aumento da confiabilidade entregue através da metodologia, surge com o resultado das ações definidas para mitigar os modos de falha e evitar reincidências, permitindo a redução da taxa de falha. Deste modo, para um mesmo tempo (t), a confiabilidade (R) passará a possuir um módulo, devido redução da taxa de falhas. Deste modo, com base nas discussões a respeito das entregas permitidas pela metodologia, é possível lhe creditar como estratégico para o aumento da confiabilidade em um processo produtivo.

4.6 Diagrama Jack-Knife

Para o desenvolvimento do diagrama Jack-Knife, se fez necessária a utilização de *software* para aplicação do *business intelligence*. A ferramenta escolhida para utilização foi, mais uma vez, o *Power BI*, da *Microsoft*. O processo, por ser uma abordagem computacional, demandou a execução de menos tarefas, sendo estas:

- *Upload* da base de dados;
- Desenvolvimento gráfico;
- Análises de criticidade.

4.6.1 Upload de Dados

Assim como abordado na metodologia do Perfil de Perdas (4.3), o banco de dados utilizado para o processamento de dados e definição do Jack-Knife, foi extraído a partir da planilha de Paradas de Produção, referente ao primeiro semestre de 2023. Deste modo, a figura (15), aborda o resumo do banco de dados, ainda bruto, utilizado para aplicação do método e respectivo *upload* no *Power BI*.

4.6.2 Desenvolvimento Gráfico

Para o desenvolvimento do Jack-Knife, foi utilizado um visual gráfico nativo ao *Power BI*, denominado como "Gráfico de Dispersão". Deste modo, o visual foi configurado de modo a relacionar MTTR e frequência (n), gerando gráficos para visualização da criticidade dos equipamentos e das causas das falhas. Por fim, foram adicionados os limites móveis, tanto para o eixo horizontal (3.1.2.2), quanto o vertical (3.1.2.2). A obtenção dos valores seguiu as formulações supracitadas e que foram discutidas ainda na seção de metodologias. A figura a seguir (25) apresenta o gráfico utilizado:



Figura 25 – Modelo de visual gráfico utilizado para o desenvolvimento do Jack-Knife.

Fonte: Autoria própria (2023).

4.6.3 Análises de Criticidade

A partir das informações supracitadas, foi possível desenvolver graficamente a dispersão logarítmica necessária ao Jack-Knife. Deste modo, as figuras a seguir (26 e 27) abordam as classificações e os resultados obtidos após a aplicação do método:

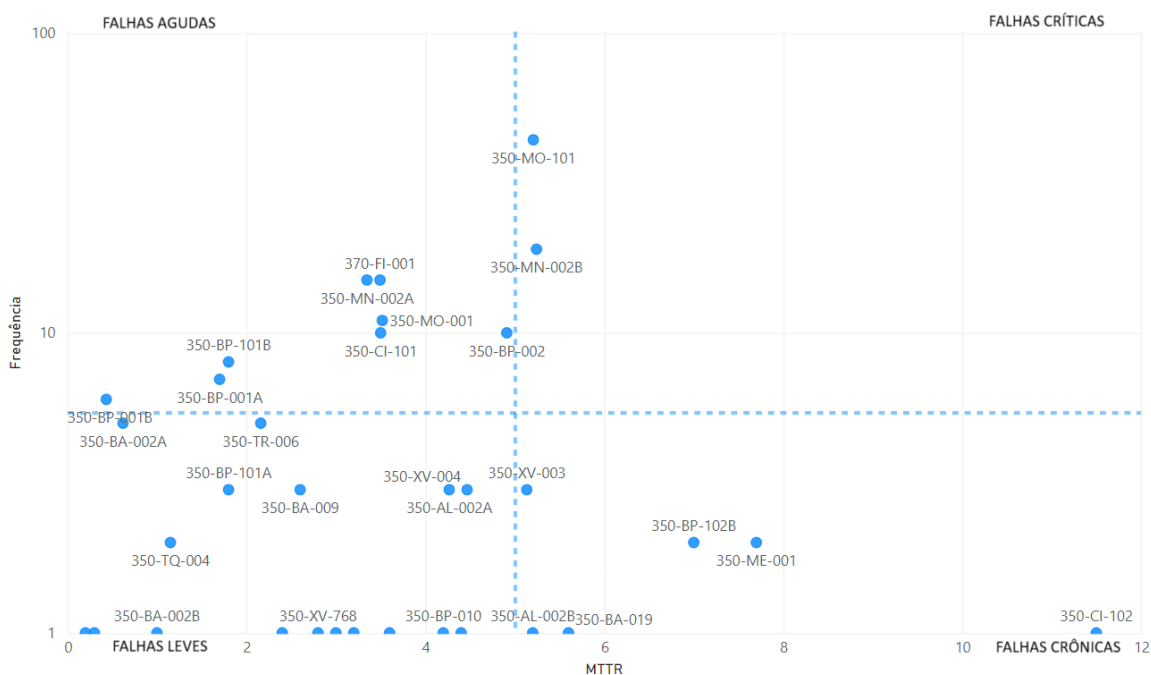


Figura 26 – Gráfico como imagem: Aplicação do Jack-Knife - equipamentos.
Fonte: Autoria própria (2023).

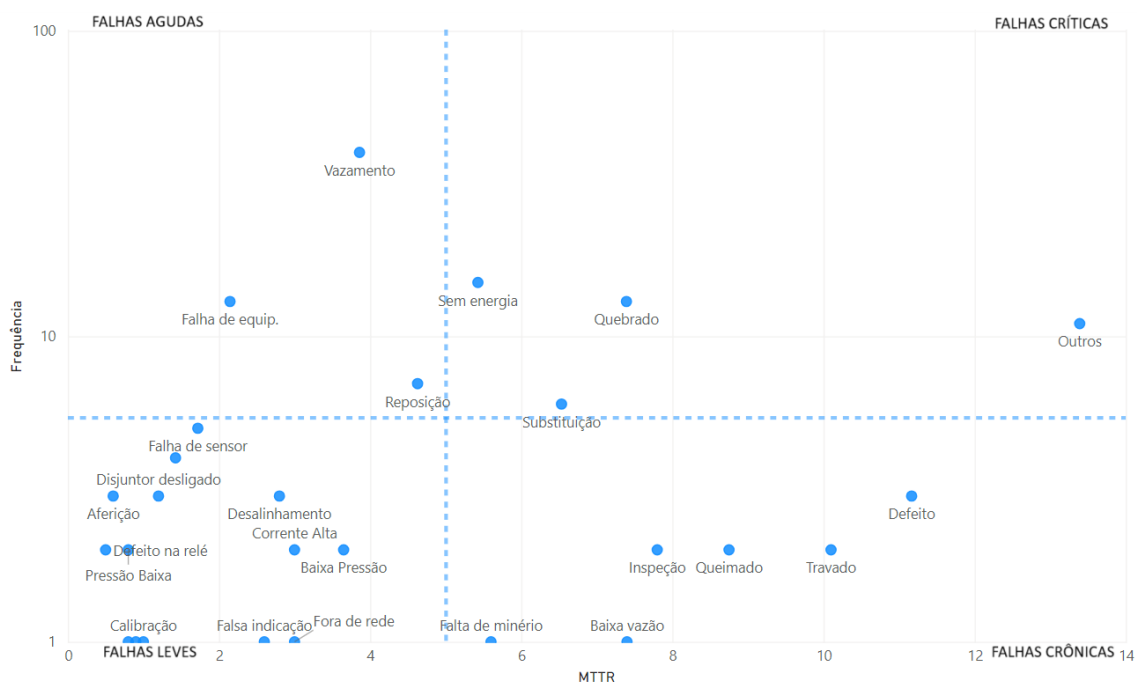


Figura 27 – Gráfico como imagem: Aplicação do Jack-Knife - causas de falha.
Fonte: Autoria própria (2023).

Os gráficos de dispersão logarítmica dispostos acima (26 e 27), apresentam a aplicação do Jack-Knife para equipamentos e causas de falha. A partir da abordagem é possível identificar quais tags e classes de falha se enquadraram como críticos, crônicos, agudos ou crônicos, no primeiro semestre de 2023, sendo identificados através dos pontos distribuídos em azul - acompanhados do rótulo de dados.

A distinção entre os quadrantes ocorre à partir da intensidade do MTTR e da frequência de ocorrência. Os equipamentos ou causas críticas apresentam elevado módulo para o tempo entre falhas e elevada frequência de ocorrência. As classes atribuídas como agudas ou críticas possuem, respectivamente, elevada frequência com baixo MTTR e baixa frequência com elevado MTTR. Por fim, a categoria leve classifica tags e causas com baixa frequência de falhas e baixo módulo de MTTR.

4.6.4 Avaliação do Método

O presente método, diagrama Jack-Knife, foi inicialmente descrito por Knights (2004) para, de acordo com Marcovicz (2018), "identificar prontamente falhas que afetam a confiabilidade do sistema, disponibilidade e manutenibilidade". Deste modo, por se tratar de um método quantitativo, baseado em gráficos, funções e bases de dados, o Jack-Knife permite análises muito assertivas quando alimentado com informações confiáveis e corretamente tratadas.

Como observado na figura (27), o gráfico de modos de falha foi substituído pelo gráfico de causas de falha, que é mais genérico. O fato ocorreu devido a despadronização na descrição dos modos de falha, que ocasionou a geração de um gráfico desordenado e repleto de informações duplicadas, sendo assim, diferentemente do ocorrido com a metodologia do Perfil de Perdas (4.3), optou-se para o Jack-Knife o uso das causas de falha, devido a melhor padronização - apesar da maior generalidade.

A discussão acima evidencia a maior fraqueza encontrada para o método: depender da qualidade da base de dados. No entanto, em relação aos benefícios de utilização, é possível observar *insights* não alcançados por outras abordagens, com o Pareto. Através do Jack-Knife é possível interpretar quais equipamentos ou falhas possuem maior reincidência, maior impacto por ocorrência ou ambos. O que garante um melhor direcionamento para as tratativas geradas após a análise.

Conforme afirmado para os demais métodos, o foco do estudo do diagrama Jack-Knife se limita à entender os possíveis resultados entregues pela metodologia, de modo a se obter o aumento de confiabilidade em um processo produtivo, no caso, a moagem. Desta forma, a presente pesquisa não se preocupa com o estudo de como se obter melhores tomadas de decisão a partir das análises e sim com o que o método pode fornecer. Por fim, com base nas possibilidades identificadas a partir do uso do Jack-Knife, é possível lhe creditar como estratégico para o aumento da confiabilidade em um processo produtivo, tomando confiabilidade como o conceito discutido no referencial teórico (2.7).

4.7 Relações Intermetodológicas

Após a abordagem dos métodos definidos para o escopo da presente pesquisa, torna-se necessária a realização de comparativos entres os métodos, visando identificar os pontos fortes e as fraquezas de cada método. A figura a seguir (28) aborda o comparativo intermetodológico, baseado nas observações realizadas durante a aplicação e análise dos distintos métodos para aumento da confiabilidade:

Modo de Falha	Complexidade	Subjetividade	Mensurabilidade	Assertividade
Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)	Moderado	Alto	Moderado	Alto
Perfil de Perdas	Baixo	Baixo	Alto	Alto
5 Porquês	Baixo	Alto	Baixo	Moderado
Reliability Centered Maintenance (RCM)	Alto	Alto	Baixo	Alto
Diagrama Jack-Knife	Moderado	Baixo	Alto	Alto

Figura 28 – Quadro como imagem: Relações Intermetodológicas.

Fonte: Adaptado de Berestinas (2020) e TRT4 (2018).

- **Complexidade:** Grau de dificuldade na elaboração do método;
- **Subjetividade:** Grau de subjetividade envolvido no método;
- **Mensurabilidade:** Grau de capacidade do método de produzir resultados mensuráveis;
- **Assertividade:** Grau de precisão do método na identificação e resolução de falhas.

Os conceitos que fundamentam a classificação de cada um dos itens como "alto", "moderado" ou "baixo", ressoam da obra de Berestinas (2020) e do capítulo de Metodologia (3.1.2.3), se baseando nas visões de complexidade, abordadas por Shindler et al. (2022), de subjetividade e mensurabilidade, trazidas por Ramos et al. (2016) através das ideias de representação qualitativa e quantitativa e, por fim, pela adaptação do conceito de assertividade abordado por Moraes et al. (2017).

Ao se observar a tabela de Relações Intermetodológicas (28), é possível identificar os aspectos distintivos de cada método analisado. A complexidade de implementação dos métodos, a subjetividade associada a cada método, a mensurabilidade dos resultados e a assertividade ou capacidade de identificar corretamente as falhas varia de forma não harmônica entre os métodos. Essa variação se torna positiva ao permitir distintas formas de se analisar e priorizar modos de falhas. O tabelamento anterior, no entanto, não surge para definir qual o melhor recurso a ser utilizado e sim como uma ferramenta para entendimento das características dos métodos abordados, de acordo com a experiência trazida durante o desenvolvimento da pesquisa. O real entendimento, no entanto, da melhor metodologia de aplicação para aumento da confiabilidade da moagem surge ao se levantar o questionamento de "qual o objetivo final desta metodologia?". Tal questionamento direciona o entendimento de que, apesar do sucesso em analisar e priorizar os modos de falha, apenas um método foca no desenvolvimento imediato de planos preventivos para prevenção e mitigação pró-ativa dos problemas de área, sendo este o RCM.

A metodologia de RCM já possui, intrínseca em sua definição, o direcionamento para o aumento de confiabilidade e, por conseguinte, age multidisciplinarmente para definir as medidas de contenção, de modo a mitigar os modos de falha. Por vezes, no entanto, a metodologia é associada ao FMEA, fazendo uso do conceito de RPN para devidas priorizações. No entanto, o foco do método sempre se dá em entender a condição processual de cada equipamento, qual é o modo de falha, o seu efeito e a definição da melhor tratativa para que seja possível agir pró-ativamente e, por vezes, definindo planos e rotas de manutenção.

Sendo assim, ao se almejar o aumento da confiabilidade e a redução da taxa de falhas de uma determinada área ou equipamento, a metodologia de RCM sempre deverá surgir, para boa parte dos casos, como um excelente recurso de elevada assertividade. O desdém pelos demais métodos, no entanto, não deve ser pauta. Afinal, cada metodologia entrega uma determinada particularidade, seja em realizar apontamentos de criticidade, grau de priorização, percentual de impacto ou até mesmo de expor as visões dos colaboradores de campo sobre um dado problema. Deste modo, a decisão de qual método se utilizar em cenários produtivos diferentes do abordado na presente pesquisa deverá passar por uma longa análise de definição por parte da equipe ou do colaborador responsável pe análise dos modos de falha da planta.

5 CONCLUSÕES

Com base na exploração aprofundada das estratégias e métodos de análise de modos de falhas para aumentar a confiabilidade da moagem em plantas de beneficiamento de minérios, esta pesquisa destacou a importância crítica desse tema na indústria de mineração. A estabilidade do processo de moagem é essencial para garantir a operação eficaz e produtiva, e qualquer falha nesse aspecto pode ter repercussões significativas, como paradas corretivas frequentes, aumento de custos de manutenção, perda de produção e a redução da qualidade dos produtos finais.

Os métodos abordados, como *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA), Perfil de Perdas, 5 Porquês, *Reliability Centered Maintenance* (RCM) e Diagrama Jack-Knife, oferecem abordagens diversas para análise de falhas e melhoria da confiabilidade. Cada um deles tem suas próprias complexidades, níveis de subjetividade, capacidade de mensuração e assertividade, como demonstrado na tabela de Relações Intermetodológicas (28).

A pesquisa identificou, no entanto, que a metodologia de *Reliability Centered Maintenance* apresenta o diferencial de ser direcionado ao desenvolvimento de planos preventivos, de modo a antecipar as falhas, que lhe permite se destoar dos demais métodos e ser avaliado como a melhor opção, ainda que na presente pesquisa, para aumentar a confiabilidade da moagem da empresa analisada. A seleção do método mais apropriado, contudo, dependerá das necessidades específicas de cada planta, das características do processo e dos recursos disponíveis em cada empresa. A compreensão das características individuais de cada método é essencial para escolher a abordagem mais adequada em cenários diferentes do que fora descrito neste estudo.

Além disso, a pesquisa reforça a importância da confiabilidade, vista como um fator estatístico, na indústria de mineração, destacando a necessidade de aprimorar continuamente os processos e a manutenção para garantir a disponibilidade dos equipamentos e a eficácia operacional. A implementação de estratégias preventivas, como a Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) e as metodologias envolvidas no Lean Six Sigma, podem contribuir significativamente para o aumento da produtividade e a competitividade no mercado.

O presente estudo também enfatiza a relevância do monitoramento e registro, em tempo real, dos eventos ocorridos nos ativos e da necessidade de uma equipe dedicada ao Planejamento, Programação e Controle de Manutenção (PPCM) nas indústrias de mineração. A gestão eficaz dos ativos físicos na moagem é essencial para evitar desperdícios de tempo, capital e recursos, bem como para obter melhores resultados produtivos por meio da estabilidade e confiabilidade operacional. E, como identificado, apesar do estudo ter se restringido ao setor de moagem, os métodos gerenciais utilizados podem ser extrapolados para quaisquer outra aplicação, seja outras áreas de uma determinada mineradora ou até mesmo em processos produtivos totalmente distintos, desde que atinjam os requisitos mínimos definidos nas condições de contorno deste estudo.

Sem dúvida, as descobertas e análises realizadas nesta pesquisa abrem caminho para uma abordagem mais criteriosa e eficaz na gestão da confiabilidade da moagem em plantas de beneficiamento de minérios, principalmente no que tange o conceito de definir as melhores estratégias para a definição de tratativas e planos de ação, posteriores à análises. As conclusões obtidas ao longo deste estudo ainda não fornecem uma base sólida para a tomada de decisões ou desenvolvimento de estratégias de melhoria contínua, focando apenas em identificar as potencialidades de cada método e associar seus benefícios para uso em função do aumento da confiabilidade. No entanto, conforme supracitado, o conhecimento adquirido pode ser aplicado em outras áreas industriais, permitindo que as organizações otimizem seus processos e se adaptem às demandas competitivas em constante evolução. Afinal, a confiabilidade é uma peça fundamental no quebra-cabeça da eficiência operacional, e esta pesquisa lança luz sobre como as mineradoras podem fortalecer essa base para enfrentar os desafios do mercado.

Concluindo, esta pesquisa contribui para um maior entendimento das equipes de manutenção na indústria de mineração sobre as técnicas e ferramentas disponíveis para garantir produções estáveis e o cumprimento dos orçamentos. Ela oferece *insights* valiosos sobre como melhorar a confiabilidade da moagem e, por extensão, a eficácia das operações em plantas de beneficiamento de minérios. No cenário competitivo em que as mineradoras operam, a busca pela confiabilidade se torna uma peça-chave para alcançar o sucesso e a sustentabilidade a longo prazo. Com isso, encerra-se a pesquisa com a convicção de que as informações e análises apresentadas contribuirão significativamente para o aumento da confiabilidade da moagem, com avanço da indústria de mineração e com a busca contínua pela excelência operacional.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR5462, Confiabilidade e Manutenibilidade**. [S.l.], 1994. NBR 5462. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 26.
- AUGUSTO, C. C. **Ferramenta da qualidade**. Tese (Doutorado), 2021. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 32.
- BARRIENTOS, A. D. P. *et al.* Decisiones gerenciales bajo el principio de pareto. **Revista Ciencia Administrativa**, n. 1, 2022. Citado na página 45.
- BERESTINAS, G. **Métodos de comparação da intensidade de agitação**. 2020. Disponível em: <https://mixtecpro.com.br/blog_intensity.php>. Citado na página 55.
- CHRYSLER, L.; MOTORS, G. Potential failure mode and effect analysis (fmea): reference manual. **Edisi Ke-4, USA: Ford Motor Company**, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 41.
- COMPANY, F. M. Effects analysis fmea handbook (with robustness linkages) v4. 2. **Ford Motor Company**, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 14, 29 e 30.
- DELERS, A. **O princípio de Pareto para a gestão empresarial: Expandir o seu negócio com a regra 80/20**. [S.l.]: 50Minutos. es, 2023. Citado na página 30.
- FABRO, E. *et al.* Modelo para planejamento de manutenção baseado em indicadores de criticidade de processo. Florianópolis, SC, 2003. Citado na página 16.
- FAVARIN, R. L. **Planejamento de Manutenção Preventiva em uma Indústria do Ramo Metal Mecânico**. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018. Citado na página 16.
- FIGUEIRA, H. V.; LUZ, A. B. d.; ALMEIDA, S. L. M. d. Britagem e moagem. In: . [S.l.]: CETEM/MCT, 2010. Citado na página 21.
- FOGLIATO, F.; RIBEIRO, J. L. D. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. [S.l.]: Elsevier Brasil, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 13, 18 e 19.
- FRANÇA, S. C. A.; CASQUEIRA, R. d. G. Ensaios de filtragem em filtro de folha (leaf test). In: . [S.l.]: CETEM/MCTI, 2007. Citado na página 22.
- FRANÇA, S. C. A.; MASSARANI, G. Sólido-líquido. CETEM/MCTI, 2002. Citado na página 23.
- GIL, A. C. Métodos e técnicas de pesquisa social. são paulo: Atlas. 2009. Citado na página 14.
- GONZÁLEZ, M. G. *et al.* **Mejora de metodología RCM a partir del AMFEC e implantación de mantenimiento preventivo y predictivo en plantas de procesos**. Tese (Doutorado) — Universitat Politècnica de València, 2011. Citado na página 34.
- JACOBS, H.; COELHO, V. C. M.; OLIVEIRA, F. M. de. Método jack-knife aplicado na análise de falhas em harvester e forwarder. **Revista Técnico-Científica**, 2022. Citado na página 35.
- JESUS, R.; SILVA, R. Gestão da manutenção de equipamentos em uma mineradora. 2022. Citado na página 13.

- JR, M. **Beneficiamento: O que você precisa saber**. 2018. <<https://www.minasjr.com.br/beneficiamento-o-que-voce-precisa-saber/>>. Acesso em: 23 de dezembro de 2023. Citado na página 13.
- JUNIOR, G. d. C. V. Aplicando a metodologia lean six sigma ao programa netuno: Conduzindo à excelência utilizando dmaic: Applying lean six sigma methodology to the neptune program: Driving to excellence using dmaic. **Revista Gestão e Conhecimento**, v. 16, n. 2, p. 547–564, 2022. Citado na página 19.
- KNIGHTS, P. F. Downtime priorities, jack-knife diagrams, and the business cycle. **Maintenance Journal**, Citeseer, v. 17, n. 2, p. 14–21, 2004. Citado 3 vezes nas páginas 14, 35 e 54.
- LUZ, A. B. d.; LINS, F. A. F. Introdução ao tratamento de minérios. In: . [S.l.]: CETEM/MCTIC, 2018. Citado na página 21.
- MADUREIRA, R. P. d. S. **Integração de ferramentas lean e metodologia RCM no contexto da indústria automível: uma análise do estado atual**. Dissertação (Mestrado), 2022. Citado na página 51.
- MARCOVICZ, F. L. Aplicação do método jack-knife para determinar falhas críticas em uma mandrilhadora. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018. Citado na página 54.
- MARTINS, V. P. Desenvolvimento de software para o planejamento de manutenção de uma linha de laminação. 2023. Citado na página 17.
- MORAES, C. A. de; GONZAGA, R. P. Análise da assertividade orçamentária dos resultados gerencial e financeiro de uma multinacional brasileira. In: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. **USP International Conference in Accounting**. [S.l.], 2017. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 55.
- MOUBRAY, J. **RCM II: Reliability-Centered Maintenance**. 2nd. ed. United Kingdom: Aladon Ltd., 1997. ISBN 0-9539603-0-7. Citado 3 vezes nas páginas 14, 33 e 34.
- MOURA, K. **Engenharia 360, O que é Tagueamento e qual sua Importância?** 2017. Disponível em: <<https://engenharia360.com/o-que-e-tagueamento-e-qual-sua-importancia/>>. Citado na página 16.
- NETO, V. G. G. Padronização do processo de manutenção de fusos–projeto seis sigma. 2022. Citado na página 48.
- RAMOS, A. P. M. *et al.* Avaliação qualitativa e quantitativa de métodos de classificação de dados para o mapeamento coroplético. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 3, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 55.
- RAMOS, M. C. d. F. A influência do perfil de perdas na melhoria da confiabilidade dos comboios misto e diesel no setor de equipamentos convencionais e empilhadeiras em uma empresa mineradora. 2020. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 30.
- RAUSAND, M.; HOYLAND, A. **System reliability theory: models, statistical methods, and applications**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2003. v. 396. Citado na página 25.
- ROMÃO, D. **ENGETELES, Cadastro e Tagueamento de Ativos Industriais**. 2022. Disponível em: <<https://engeteles.com.br/cadastro-e-tagueamento-de-ativos-industriais/>>. Citado na página 16.

- SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; LUZ, A. B. d. Ensaios de separação magnética e eletrostática. In: . [S.l.]: CETEM/MCTI, 2007b. Citado na página 22.
- SAMPAIO, J. A.; OLIVEIRA, G. P.; SILVA, A. O. d. Ensaios de classificação em hidrociclone. In: . [S.l.]: CETEM/MCTI, 2007a. Citado na página 21.
- SASDELLI, M. C. B. Utilização de ferramentas da qualidade para a geração de inovação em processo: um case de análise de perda em uma indústria de embalagen cartonadas. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2012. Citado na página 32.
- SHINDLER, M. *et al.* Beyond big o: teaching experimental algorithmics. **Journal of Computing Sciences in Colleges**, Consortium for Computing Sciences in Colleges, v. 37, n. 10, p. 23–36, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 55.
- SOUZA, M. S. de; SANTANA, E. R. S. de. A importância do planejamento e controle da manutenção: um estudo na aflu indústria de bebidas. 2012. Citado na página 18.
- SUZANO, M. A. A utilização do indicador de eficiência oee (overall equipment effectiveness): Estudo de caso em uma indústria farmacêutica. **ScientiaTec**, v. 7, n. 2, 2020. Citado na página 24.
- TAVARES, H. D. F. *et al.* Aplicação de metodologias rcm nos planos de manutenção de sistemas de proteção, comando e controle. 2012. Citado na página 33.
- TEIXEIRA, E. B. A análise de dados na pesquisa científica: importância e desafios em estudos organizacionais. **Desenvolvimento em questão**, v. 1, n. 2, p. 177–201, 2003. Citado na página 38.
- Tribunal Regional do Trabalho da 4ª Região. **Gestão de Riscos Estratégia**. 2018. Disponível em: <<https://www.trt4.jus.br/portais/trt4/gestao-de-riscos-estrategia>>. Citado na página 55.
- VIANA, H. R. G. **PCM - Planejamento e Controle da Manutenção**. [S.l.]: Qualitymark Editora Ltda, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 20.
- ZANETTI, M. B. Aplicação da metodologia fmea para revisão das estratégias de manutenção em equipamentos de perfuração de uma mineradora. 2019. Citado na página 13.
- ZUZA, S. M. P. Avaliação da importância do planejamento e programação na manutenção: um estudo de caso na indústria siderúrgica capixaba. Serra, 2022. Citado na página 17.