



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**

**CHRISTIANE PALMIERE CAMPOS VIEIRA**

**APLICAÇÃO DO MÉTODO DE MONTE CARLO COMO FERRAMENTA PARA  
PLANEJAMENTO E CONTROLE DA MANUTENÇÃO EM SIRENES DE  
BARRAGENS DE REJEITOS NA MINERAÇÃO**

**BELO HORIZONTE**

**2023**

**CHRISTIANE PALMIERE CAMPOS VIEIRA**

**APLICAÇÃO DO MÉTODO DE MONTE CARLO COMO FERRAMENTA PARA  
PLANEJAMENTO E CONTROLE DA MANUTENÇÃO EM SIRENES DE  
BARRAGENS DE REJEITOS NA MINERAÇÃO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, parceria ampla entre o CEFET-MG e UFSJ como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

**Área de Concentração:** Sistemas Elétricos.

**Linha de Pesquisa:** Eletromagnetismo Aplicado.

**Orientador(a):** Profa. Dra. Úrsula do Carmo Resende

**BELO HORIZONTE**

**2023**

V658a Vieira, Christiane Palmiere Campos  
Aplicação do método de Monte Carlo como ferramenta para planejamento e controle da manutenção em sirenes de barragens de rejeitos na mineração / Christiane Palmiere Campos Vieira. – 2023.  
81 f.: il., gráfs, tabs.

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica em associação ampla entre a UFSJ e o CEFET-MG.  
Orientadora: Úrsula do Carmo Resende.  
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

1. Barragens de rejeitos – Manutenção e reparos – Teses. 2. Monte Carlo, Método de – Teses. 3. Mineração – Planejamento – Teses. I. Resende, Úrsula do Carmo. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Universidade Federal de São João del-Rei. IV. Título.

CDD 621.3028

**CHRISTIANE PALMIERE CAMPOS VIEIRA**

**APLICAÇÃO DO MÉTODO DE MONTE CARLO COMO FERRAMENTA PARA  
PLANEJAMENTO E CONTROLE DA MANUTENÇÃO EM SIRENES DE  
BARRAGENS DE REJEITOS NA MINERAÇÃO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, parceria ampla entre o CEFET-MG e UFSJ como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

PÁGINA DE APROVAÇÃO PROVISÓRIA

Prof. Dr. \_\_\_\_\_ Instituição

Assinatura: \_\_\_\_\_.

Dedico este trabalho a Deus, a minha família e a toda equipe da Gerência de Planejamento e Controle da Manutenção da Tecnologia com quem trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, em Sua infinita bondade e misericórdia, por guiar-me nos momentos mais difíceis e me sustentar até aqui.

Aos meus pais, Silvana Valéria Campos (*in memoriam*) e Murilo Silvério Vieira (*in memoriam*), que mesmo não estando mais presentes fisicamente, sempre me apoiaram e contribuíram para a realização dos meus sonhos. E com certeza, continuam me iluminando sempre.

Aos meus tios e primas, que na ausência dos meus pais, torceram por mim e foram fundamentais nos desafios, me suportando com muito carinho e atenção. Jordan, Elaine, Jordânia e Raiane essa vitória também é de vocês.

Ao meu marido Alex, pelo amor, parceria e compreensão, por estar ao meu lado nos momentos de alegria e principalmente nos de dificuldade, a caminhada foi árdua e no meio dela fui abençoada com a chegada da nossa filha Clarice, fruto do nosso amor e minha maior motivação para finalizar essa etapa.

A minha professora orientadora Dra. Úrsula do Carmo Resende pelo comprometimento, dedicação e apoio durante a elaboração deste trabalho e ao longo do mestrado.

Aos meus amigos, em especial ao Paulo Henrique Vieira Soares e Fernando de Souza Paiva pela confiança, disponibilidade e apoio em todos os momentos desde o início dessa trajetória, com certeza o incentivo de vocês foi primordial para essa conquista.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desse estudo e para a minha formação acadêmica e profissional.

## RESUMO

O presente trabalho aborda aplicação do método de Monte Carlo como ferramenta para planejamento e controle da manutenção em sirenes de barragens de rejeitos na mineração. As estratégias que permitam a melhoria constante do planejamento e execução da manutenção, sobretudo na questão das sirenes de barragens, são fundamentais, visto o potencial letal de um sinistro dentro das mineradoras. Assim, neste trabalho foi investigada a aplicação do Método Monte Carlo para análise de previsibilidade de manutenção em postes de sirenes em barragens de rejeitos de mineração. Especificamente, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre processos de mineração, barragens de rejeitos e processos de controle e gerenciamento manutenção; foi investigada a abrangência de aplicação do método Monte Carlo na indústria considerando sua aplicação para o planejamento e controle da manutenção; e, o método foi aplicado para estimativa de recursos dedicados a manutenção de postes de sirenes em barragens de rejeitos de mineração considerando o cenário de manutenções de maior criticidade. Por meio de uma abordagem quantitativa e qualitativa com foco em descrever, interpretar e compreender a percepção da gestão da segurança em barragens de contenção de rejeitos de mineração foi realizado um levantamento bibliográfico, buscando atender uma demanda de informações sobre a gestão da manutenção das barragens no ramo industrial minerador a partir do cenário nacional que fundamentou principalmente na comparação dos critérios de classificação de barragens no Brasil e as perspectivas de manutenção considerando as legislações e medidas adotadas para promoção da segurança em barragens. O estudo de caso se deu por meio de dados de barragens de contenção de rejeitos de uma empresa de mineração atuante no estado de Minas Gerais como fonte real para a aplicação do Método Monte Carlo. O principal resultado encontrado foi a comprovação da eficácia do Método Monte Carlo para a análise de previsibilidade de manutenção em postes de sirenes em barragens de rejeitos. Verificou-se eficácia ao traçar a tendência de cenários de falhas futuras, baseado no histórico, com oscilações estatisticamente previstas através da geração de números aleatórios. Foi possível concluir que a metodologia proposta e aplicada ao conjunto de falhas dos postes de sirene em barragens de rejeitos de mineração com intuito de previsibilidade de falhas, para cenários pessimista e otimista foi validada e permite o direcionamento da manutenção de forma assertiva. E ainda permitiu compreender que a elevação do número de falhas críticas após a realização dos simulados práticos de emergência, podem vir a caracterizar uma especificação de projeto tecnicamente inadequada para a condição de aplicabilidade dos componentes eletrônicos das sirenes.

**Palavras chaves:** Barragem de Rejeitos. Manutenção. Método Monte Carlo. Mineração. Planejamento.

## ABSTRACT

The present work deals with the application of the Monte Carlo method as a tool for planning and controlling the maintenance of sirens in tailings dams in mining. Strategies that allow constant improvement in maintenance planning and execution, especially in the issue of dam sirens, are fundamental, given the lethal potential of an accident within mining companies. Thus, in this work, the application of the Monte Carlo Method was investigated to analyze the predictability of maintenance on siren poles in mining tailings dams. Specifically, a literature review was carried out on mining processes, tailings dams and maintenance control and management processes; the scope of application of the Monte Carlo method in industry was investigated considering its application for maintenance planning and control; and, the method was applied to estimate the resources dedicated to the maintenance of siren posts in mining tailings dams, considering the most critical maintenance scenario. Through a quantitative and qualitative approach focused on describing, interpreting and understanding the perception of safety management in mining tailings containment dams, a bibliographic survey was carried out, seeking to meet a demand for information on the maintenance management of dams in the mining industrial branch from the national scenario that was based mainly on the comparison of the classification criteria of dams in Brazil and the maintenance perspectives considering the legislation and measures adopted to promote safety in dams. The case study was based on data from tailings containment dams of a mining company operating in the state of Minas Gerais as a real source for the application of the Monte Carlo Method. The main result found was the confirmation of the effectiveness of the Monte Carlo Method for the analysis of maintenance predictability in siren poles in tailings dams. Efficiency was verified when tracing the trend of scenarios of future failures, based on the history, with statistically predicted oscillations through the generation of random numbers. It was possible to conclude that the methodology proposed and applied to the set of failures of siren posts in mining tailings dams with the aim of predicting failures, for pessimistic and optimistic scenarios, was validated and allows directing maintenance in an assertive way. And it also allowed us to understand that the increase in the number of critical failures after carrying out the practical emergency simulations, may come to characterize a technically inadequate design specification for the applicability condition of the electronic components of the sirens.

**Keywords:** Tailings dam. Maintenance. Monte Carlo method. Mining. Planning.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01- Panorama do setor de mineração.....	20
Figura 02- Constituição física de uma barragem de rejeitos.....	24
Figura 03- Método de alteamento das barragens de rejeitos.....	25
Figura 04- Organização das práticas de manutenção.....	36
Figura 05- Fluxograma da gestão de risco das barragens de rejeitos.....	40
Figura 06- Fluxograma simplificado do processo de simulação do método de Monte Carlo.....	44
Figura 07- Diagrama de blocos de análise de dados.....	52
Figura 08- Estratégia do sistema de Acionamento Automático das Sirenes.....	54
Figura 09- Topologia de rede do sistema de Acionamento Automático das Sirenes.....	55
Figura 10- Árvore de falhas de sirenes.....	56
Figura 11- Gráfico sequencial do total de falhas por mês.....	58
Figura 12- Gráfico <i>boxplot</i> do total de falhas por mês.....	60
Figura 13- Gráfico de probabilidade normal do total de falhas por mês.....	62
Figura 14- Gráfico sequencial de falhas críticas por mês.....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01- Bases para o gráfico <i>boxplot</i> .....	60
Tabela 02- Resultados estatísticos.....	64
Tabela 03- Validação da metodologia para aplicação do Método Monte Carlo ao conjunto de falhas totais dos postes de sirene de barragens de rejeitos da mineração.....	68
Tabela 04- Validação da metodologia para aplicação do Método Monte Carlo ao conjunto de falhas críticas dos postes de sirene de barragens de rejeitos da mineração.....	69

## LISTA DE QUADROS

Quadro 01- Tipo de alteamento.....	26
Quadro 02- Classificação das barragens de mineração de acordo com a categoria de risco e dano potencial associado.....	28
Quadro 03- Legislação de segurança das barragens de rejeitos no Brasil.....	31
Quadro 04- Passos para operacionalização da simulação Monte Carlo.....	44
Quadro 05- Detalhamento dos testes do sistema de Acionamento Automático das Sirenes.....	56
Quadro 06- Falhas que as sirenes podem apresentar.....	57

## LISTA DE SIGLAS

- AAS – Acionamento Automático de Sirene
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ANM – Agência Nacional de Mineração
- BI – Plataforma unificada e escalonável para business intelligence (BI) Microsoft Power Business Intelligence®
- CEFM – Compensação Financeira pela Exploração Mineral
- Cw – Concentração de sólidos
- DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral
- ENIAC – Primeiro Computador digital
- IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração
- MG – Minas Gerais
- NBR – Norma Técnica da ABNT
- PAEBM – Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração
- PE – Ponto de Encontro
- PNSB – Política Nacional de Segurança de Barragens
- Q1 – Primeiro Quartil
- Q2 – Segundo Quartil
- Q3 – Terceiro Quartil
- RCM – Reliability Centered Maintenance (Manutenção Centrada na Confiabilidade)
- SSC – Sistema de Supervisão e Controle
- TF – Total de Falhas
- WSN – Rede de Sensores Sem Fio
- ZAS – Zona de Autossalvamento

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1	Objetivos.....	16
1.1.1	Objetivo geral.....	16
1.1.2	Objetivo Específico.....	16
1.2	Justificativa.....	17
1.3	Delimitação.....	17
1.4	Estrutura do Trabalho.....	18
<b>2</b>	<b>MANUTENÇÃO DAS BARRAGENS DE REJEITOS DA MINERAÇÃO.....</b>	<b>19</b>
2.1	A atividade de mineração no Brasil.....	19
2.2	Barragens de Rejeitos.....	21
2.2.1	Métodos construtivos das barragens de rejeitos.....	23
2.2.2	Os riscos das barragens de rejeitos.....	27
2.2.3	Legislação para barragens de rejeitos.....	29
2.3	Manutenção industrial: do planejamento ao controle das barragens de rejeitos da indústria mineradora.....	32
2.3.1	Aspectos da manutenção.....	35
2.3.2	Especificidades da manutenção nas barragens de rejeitos.....	38
2.4	Considerações finais.....	40
<b>3</b>	<b>DESCRIÇÃO DO MÉTODO DE MONTE CARLO.....</b>	<b>41</b>
3.1	Definição do método Monte Carlo.....	41
3.2	Descrição metodológica do Método Monte Carlo.....	43
3.3	Modelagem matemática para aplicação envolvendo integrais.....	45
3.4	Considerações Finais.....	50
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA PROPOSTA.....</b>	<b>51</b>
4.1	Contextualização.....	51
4.2	Delimitação da pesquisa.....	51
4.3	Plano de análise dos dados.....	51
4.4	Pesquisa experimental: monitoramento de barragens.....	52
4.4.1	Sistema de Supervisão e Controle (SSC) e Sistema de Acionamento Automático das Sirenes (AAS).....	53
4.5	Estatística de dados das falhas de sirenes de barragens.....	57

4.5.1	Análises estatísticas de falhas totais.....	57
4.5.2	Análises estatísticas somente sob a perspectiva de falhas críticas.	62
4.6	Aplicação do método Monte Carlo para o caso de manutenção das barragens.....	64
4.6.1	Previsão do cenário futuro de falhas totais dos postes de sirenes de barragens de rejeitos através do método estocástico de Monte Carlo..	64
4.6.2	Previsão do cenário futuro somente sob a perspectiva de falhas críticas dos postes de sirene de barragens de rejeitos através do método estocástico de Monte Carlo.....	67
4.6.3	Validação.....	68
4.7	Discussão dos resultados.....	70
5	CONCLUSÕES.....	72
5.1	Sugestões de trabalhos futuros.....	73
	REFERÊNCIAS.....	74
	ANEXO A – Estatística das falhas totais por mês.....	79
	ANEXO B – Estatística de falhas críticas por mês.....	80
	ANEXO C – Estatística de falhas totais por mês separadas por quartis.....	81

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil, segundo Barcelos, Lage e Cordeiro (2020), é um país rico em recursos naturais com expressivas reservas de minérios como ouro, manganês, cobre, alumínio, níquel, nióbio e ferro, o que atrai o interesse de mineradoras movimentando a economia do país. Numa visão geral, a atividade de mineração contempla três fases na sua prática, a lavra, as operações de beneficiamento e o sistema de disposição de rejeitos, sendo que este último representa um desafio para as mineradoras, em razão dos riscos envolvidos, sobretudo à vida humana e à degradação ambiental. As barragens de rejeitos, segundo Rodrigues (2019), podem ser entendidas como uma grande estrutura construída para reter os inúmeros resíduos produzidos na mineração. A construção dessas estruturas normalmente é realizada com materiais estéreis, retirados da própria mina primando sempre pela redução de custos. Apesar de melhorias recentes nos processos de construção e manutenção das barragens, estas estruturas ainda expõem a inúmeros riscos os trabalhadores e o meio-ambiente.

De acordo com Souza Jr. e Heineck (2018) o extrativismo proporciona a geração de um volume alto de materiais removidos e movimentados no processo de beneficiamento do minério. A quantidade de rejeitos armazenada em cada barragem depende do processo extrativo empregado. Existem 839 barragens de rejeitos registradas no Brasil, sendo a maioria de pequeno porte e localizadas no estado de Minas Gerais. Nos últimos anos, o Brasil tem enfrentado problemas com relação à segurança dessas barragens, vivenciando verdadeiras tragédias que colocam em risco a população, o meio ambiente, as empresas e a economia. Desta forma, torna-se necessário e útil, o desenvolvimento de mecanismos e processos de prevenção para diminuir os riscos de eventuais acidentes.

Segundo Rodrigues (2019), existe a obrigatoriedade legal para que as empresas de mineração atendam a requisitos preventivos estabelecidos pelos órgãos reguladores responsáveis para evitar sinistros. Entretanto, estas exigências têm se mostrado insuficientes para evitar que sinistros ocorram, como ficou evidente com o rompimento da Barragem do Fundão da mineradora Samarco, em Mariana (MG), em 5 de novembro de 2015, e, com a Barragem da Mina Córrego do Feijão, da mineradora Vale, em Brumadinho, no dia 25 de janeiro de 2019, causando a morte de 272 pessoas e espalhando resíduos de minério pela bacia do Rio Paraopeba. Em 2023, essa segunda tragédia completou quatro anos (MINAS GERAIS, 2023). Esses

acontecimentos recentes, chamam a atenção para a questão do processo de manutenção de barragens, o qual deve ser realizado com a premissa de manter operante e em segurança as vidas, bem como o parque produtivo das empresas que ali operam.

Conforme Viana e Ribeiro (2017), as barragens possuem caráter estratégico, configurando-se como um fator determinante para a competitividade, por ser o pilar de sustentação do sistema de produção e produtividade da organização. Assim, o procedimento de manutenção deve primar pela qualidade do processo e do produto, adequados aos resultados propostos e requeridos pela organização. Os esforços devem ser direcionados ao suporte das atividades com base na gestão e na solução de problemas, sobretudo na questão de armazenamento de rejeitos, de forma que a empresa mantenha os patamares competitivos de qualidade e produtividade. Porém, verifica-se que, apesar de seu peso estratégico, a adoção de procedimentos de manutenção eficientes ainda enfrenta resistência dentro das organizações devido principalmente ao seu custo permanente de mão de obra e materiais.

Adicionalmente, consonante com o exposto por Viana e Ribeiro (2017), o sucesso do procedimento de manutenção de uma barragem depende do modelo de formação empregado nesta barragem e das estratégias adotadas para seu controle, as quais requerem informações claras e precisas para fundamentar cada ação. Porém tais informações dependem de análises complexas de dados que, também, impactam e incrementam os custos envolvidos.

Assim, com foco nos processos de engenharia e em resultados, busca-se procedimentos e métodos que favoreçam melhorias nos cursos de ação, prevenção e manutenção das barragens, procurando garantir maior assertividade, por meio de técnicas e métodos baseados em evidências. Conforme exposto por Amorim *et al.* (2018), qualquer empresa precisa gerenciar bem suas informações, independentemente do seu porte e/ou ramo de atividade, inclusive, proporcionando a geração de cenários para auxiliar na tomada de decisões, o que torna imprescindível o emprego de ferramentas que auxiliem e melhorem essas escolhas. Neste cenário, o método de Monte Carlo se apresenta como uma promissora opção para avaliação de dados de sistemas de controle de barragens de rejeitos de processos de mineração uma vez que se trata de um método estatístico, fundamentado em simulações, indicado para a tomada de decisões para processos e fenômenos que envolvam modelagem matemática analítica complexa.

Assim, considerando a importância, segurança e vulnerabilidade das barragens de rejeito de minério, entende-se que a manutenção mais eficaz é aquela que previne a ocorrência de falhas. Em outras palavras, o sucesso da empresa mineradora está ligado à garantia de que não ocorram falhas e, caso elas sejam inevitáveis, é importante ser capaz de prever seu surgimento. Para atingir esse objetivo, o Método Monte Carlo pode ser utilizado como uma ferramenta para a determinação probabilística da manutenção das barragens, com foco no sistema automatizado de acionamento de sirenes. Esse método permite o estudo das possíveis falhas e a implementação de medidas preventivas para minimizar os riscos. Desta forma, essas empresas podem ter melhores cenários para manter a condição de segurança e operacionalidade do sistema além de poder alertar, com a antecedência adequada, a comunidade numa eventual ocorrência de rompimento de barragem.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

O objetivo central deste trabalho é investigar a aplicação do Método Monte Carlo para análise de previsibilidade com manutenção de postes de sirenes em barragens de rejeitos de mineração.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

Como objetivos específicos pode-se destacar:

- a) Realizar revisão bibliográfica sobre processos de mineração, barragens de rejeitos e processos de controle e gerenciamento manutenção.
- b) Desenvolver metodologia para aplicação do método Monte Carlo ao conjunto de falhas dos postes de sirene em barragens de rejeitos de mineração.
- c) Investigar a abrangência do método Monte Carlo na indústria considerando sua aplicação para planejamento e controle da manutenção.
- d) Aplicar o Método Monte Carlo para estimativa de recursos dedicados a manutenção de postes de sirenes em barragens de rejeitos de mineração considerando o cenário de manutenções de maior criticidade.

## 1.2 Justificativa

De forma abrangente e generalizada, a pesquisa desenvolvida neste trabalho é justificada pela necessidade de desenvolvimento e aplicação de métodos simplificados e eficazes para melhoria da gestão da manutenção nas empresas.

O aumento da demanda e maior exigência da produtividade, qualidade e segurança nos parques industriais, pode incidir no aumento da ocorrência de falhas, que segundo Vitonto e Regattieri (2021), descortina a necessidade de um bom planejamento de manutenção, sobretudo, em casos em que ocorram falhas potencialmente prejudiciais à natureza e ao ser humano.

A relevância no estudo do método Monte Carlo está na sua contribuição útil à identificação probabilística que proporciona uma melhor compreensão dos aspectos e da necessidade de manutenção em um sistema produtivo, aqui considerado o sistema automatizado de acionamento de sirenes das barragens de rejeitos, tendo este método o potencial de melhorar a análise das condições das barragens e compreender as condições de falhas. A partir da observação do registro dos históricos de falhas, a manutenção pode ser planejada proporcionando melhor condição para produtividade, qualidade e segurança das barragens.

Adicionalmente, o estudo do Método Monte Carlos torna-se relevante também para a gestão da manutenção nas organizações por permitir a conferência dos resultados apurados em sua aplicação.

Conforme as premissas apresentadas por Oliveira, Paiva e Paiva (2019), a utilização do Método Monte Carlo mostra-se um recurso para modelagem computacional, aproximando sua aplicabilidade ao mundo organizacional, como instrumento eficaz para a resolução de problemas e para a previsão, fundamentada nos resultados simulados.

## 1.3 Delimitação

O presente trabalho delimita-se a analisar a aplicabilidade do Método de Monte Carlo na função de manutenção das barragens na indústria de mineração, por meio da análise das falhas do sistema de acionamento automático das sirenes de monitoramento das barragens na região próxima de Belo Horizonte MG.

O estudo considera barragens de uma empresa mineradora atuante no estado de MG, que possui sistema de barragens idêntico a maioria das empresas mineradoras atuantes no Brasil, permitindo ter um panorama geral do funcionamento da manutenção desse tipo de estrutura.

Delimita-se o estudo à previsibilidade de falhas totais, desdobrando-se também para as falhas críticas e a identificação dos cenários otimista e pessimista por meio do Método Monte Carlo para justificar o tipo de manutenção a ser adotada.

#### **1.4 Estrutura do trabalho**

Neste primeiro Capítulo são apresentados a contextualização do problema sob investigação, os objetivos, delimitação e estrutura do trabalho. No segundo Capítulo é apresentado o referencial teórico, descrevendo a utilização das barragens dentro da indústria de mineração e relacionando-as com os riscos, a manutenção e a legislação vigente. No terceiro Capítulo o método Monte Carlo é descrito como técnica de pesquisa e são apresentados exemplos de suas aplicabilidades. No quarto Capítulo é apresentada a metodologia proposta neste trabalho e sua aplicação ao problema sob investigação, trazendo os resultados obtidos e uma discussão sobre a aplicabilidade do Método Monte Carlo no monitoramento de barragens de rejeitos como ferramenta auxiliar na manutenção. E no quinto Capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho e proposta para continuidade da pesquisa. Encerra-se com as Referências e Anexos que dão aporte técnico ao estudo.

## 2 MANUTENÇÃO DAS BARRAGENS DE REJEITOS DA MINERAÇÃO

Neste capítulo, são apresentados conceitos relacionados à manutenção, considerando a perspectiva das mineradoras no planejamento e controle das operações das barragens de rejeitos. O objetivo é minimizar riscos e sinistros e aprimorar a gestão da manutenção, com foco na segurança e na eficiência operacional.

Inicialmente aborda-se a atividade de mineração no Brasil, inserindo a barragem de rejeitos, foco desse estudo, para melhor apresentação da motivação da pesquisa. Na sequência é apresentada a relação da manutenção industrial com a questão das barragens de rejeitos da mineração procurando afunilar o assunto para a aplicação do Método Monte Carlo.

### 2.1 A atividade de mineração no Brasil

De acordo com Thomé e Passini (2018) e Caitano *et al.* (2021), a mineração é composta por diversas atividades, tais como prospecção, pesquisa e descomissionamento. A prospecção e pesquisa envolvem um conjunto de conhecimentos, técnicas e ferramentas utilizadas para descobrir e estudar depósitos minerais (jazidas) a fim de identificar seu potencial para aproveitamento econômico. A mina, por sua vez, é a jazida em processo produtivo, de onde são extraídos dois subprodutos: o minério, que é o agregado natural de um ou mais minerais sólidos que podem ser extraídos, processados e vendidos para obtenção de lucro; e o estéril, que é o material que acompanha o minério em razão da lavra, mas que não possui valor econômico.

A mineração tem sido uma atividade presente e praticada no Brasil desde a época da colonização portuguesa e se estabeleceu como uma das principais atividades econômicas do país. Devido à sua importância para a economia nacional, a mineração é considerada essencial e fundamental para o crescimento econômico da nação.

De acordo com IBRAM (2023), a atividade mineradora foi realizada em grande escala no ano de 2022, abrangendo 2.699 municípios, o que representa quase metade (48%) dos municípios brasileiros. Essa informação foi obtida a partir do recolhimento da CFEM (*Royalty* do setor). Nesse mercado foram produzidas 91 tipologias minerais,

por mais de 7.300 empresas e microempreendedores individuais. A mineração industrial ocupa uma área equivalente a 0,06% do território nacional, aproximadamente 169,8 mil hectares, de um total de 851,6 milhões de hectares. Apesar de ter apresentado resultados inferiores aos de 2021, o setor de mineração registrou um aumento na geração de empregos em 2022, com a criação de 5,7 mil novas vagas. No total, são quase 205 mil empregos diretos e cerca de 2,25 milhões de empregos indiretos ao longo da cadeia e mercado. Para ilustrar esse cenário a Figura 01 apresenta um panorama da atividade mineradora no Brasil recentemente, permitindo demonstrar e confirmar a importância do setor para o desenvolvimento nacional.

Figura 01- Panorama do setor de mineração recentemente



Fonte: IBRAM (2023, p. 05)

Entretanto, apesar da mineração contribuir para o desenvolvimento econômico nacional, nem tudo que decorre dela traz benefícios, conforme discorrem Thomé e Passini (2018). O meio ambiente e algumas populações em torno dos veios de mineração sofrem com os impactos ambientais negativos e danos decorrentes da exploração mineral.

A mineração tem como uma das principais características a utilização de métodos extrativistas que produzem modificação no meio ambiente e geram riscos socioambientais, assim, compreende-se esse ramo industrial como uma atividade que interfere nos meios social, econômico e ambiental do local onde ocorre.

O processamento mineral, segundo Thomé e Passini (2018), engloba o conjunto de operações básicas que são realizadas em uma matéria-prima mineral (minério bruto) com o objetivo de se obter sua adequação, ou seja, produtos comercializáveis (beneficiamento). Durante esse processo ocorre a cominuição, que consiste na liberação dos minerais dos agregados, por meio de processos físico-químicos que induzem sua separação de maneira seletiva e controlada, de forma que ao final desse processo é possível distinguir o concentrado de partículas do minério que se deseja comercializar, e o rejeito, que é destinado às barragens.

A NBR 13028 conceitua as barragens de mineração como barragens, barramentos, diques, reservatórios, cavas exauridas com barramentos construídos, associado às atividades desenvolvidas com base em direito minerário, utilizados para fins de contenção, acumulação ou decantação de rejeito de mineração ou descarga de sedimentos provenientes de atividades em mineração, com ou sem captação de água associada, compreendendo a estrutura do barramento e suas estruturas associadas (SOUZA JR.; MOREIRA; HEINECK, 2018, p.11).

A decisão sobre a forma de descarte dos rejeitos tem sido baseada em critérios técnico-econômicos e legais. No Brasil, a forma de polpa tem sido o método mais utilizado, contudo, essa modalidade mostra-se a mais suscetível a acidentes.

## 2.2 Barragens de rejeitos

A barragem de rejeitos, segundo Correa *et al.* (2020), constitui-se como um depósito dos rejeitos provenientes da mineração. O termo "rejeito" é utilizado para designar todo material que sobra após a separação do minério da rocha. Esse material é depositado em forma de polpa, ou seja, uma mistura de sólidos e água, dentro de um reservatório. Thomé e Passini (2018) definem os rejeitos como sendo:

- a) Rejeito em polpa: baixas concentrações de sólidos ( $30\% < C_w < 40\%$ ), sem espessamento, segregável, onde a polpa tem sido a concentração mais comum na saída dos rejeitos de usinas de beneficiamento no Brasil;
- b) Rejeito espessado: com concentrações de sólidos aumentada através de processos mecânicos de espessamento ( $45\% < C_w < 65\%$ ), porém, ainda segregável e bombeável por bombas centrífugas;

- c) Rejeito em pasta: concentração de sólidos intermediária ( $65\% < C_w < 70\%$ ), não segregável, somente bombeável com bombas de deslocamento positivo;
- d) Rejeito em torta: alta concentração de sólidos ( $80\% < C_w < 85\%$ ), onde se tem uma massa de rejeito com baixa umidade transportável apenas através de esteiras ou caminhões.

A barragem tem a função de barreira, como o próprio nome sugere, para evitar o espalhamento e contaminação do solo. Uma estrutura de contenção construída levantando-se inicialmente um dique de partida com solo de empréstimo. Os estágios posteriores (alteamentos) podem ser construídos também com material de empréstimo, com estéreis, por deposição hidráulica de rejeitos ou por ciclonagem dos mesmos rejeitos (SABBO; ASSIS; BERTERQUINI, 2017).

Historicamente, a utilização de barragens de rejeitos teve início há cerca de 300 anos, nos primórdios da corrida do ouro no Brasil, com a atividade de mineração na Mina da Passagem, em Mariana. No início da implantação das barragens, elas eram muito limitadas e projetadas transversalmente aos cursos d'água, o que as tornava vulneráveis a graves instabilidades em períodos de inundações e chuvas fortes. Raramente havia engenheiros ou critérios técnicos envolvidos nas fases de construção e operação dessas barragens (SABBO; ASSIS; BERTERQUINI, 2017).

A partir da década de 30, com propósito de manutenção da mineração e mitigação dos impactos ambientais, as indústrias intensificaram os investimentos nas barragens. Na década de 40, com a evolução dos equipamentos de movimentação de terras, a construção de barragens de contenção de rejeitos foi aprimorada com técnicas de compactação que lhe conferiram maior grau de segurança. Na década de 70, os projetistas já possuíam um entendimento e controle avançado sobre as causas e consequências dos fenômenos e ocorrências de infiltração, liquefação e estabilidade da fundação em relação às barragens de rejeitos (SABBO; ASSIS; BERTERQUINI, 2017).

A partir da década de 80, houve um aumento significativo na importância dos aspectos ambientais, o que demandou um maior reforço nas técnicas de observação do comportamento das barragens em operação. Foi identificada a necessidade do controle da segurança em longo prazo. Além disso, a produção de rejeitos cresceu consideravelmente, resultando em maior demanda por áreas para disposição. No entanto, essas áreas também se tornaram cada vez mais escassas, especialmente

devido ao crescimento populacional nas proximidades das áreas de mineração (SABBO; ASSIS; BERTERQUINI, 2017).

Atualmente, percebe-se como urgente o monitoramento das barragens de rejeitos, principalmente pela letalidade que pode proporcionar à população local e ao meio ambiente onde a atividade industrial está inserida.

De acordo com Barcelos, Lage e Cordeiro (2020), é possível constatar que a maior parte das barragens de rejeitos no Brasil está concentrada nos estados de Minas Gerais e Pará, que são responsáveis por grande parte da produção mineral do país. Analisando a altura dessas estruturas, percebe-se que a maioria delas é considerada de pequeno porte, o que sugere que ainda estão em fase inicial de uso. Quanto ao volume, embora os estados de Minas Gerais e Pará possuam um número significativo de barragens de grande porte, a maioria das estruturas ainda pode ser classificada como de pequeno porte.

### **2.2.1 Métodos construtivos das barragens de rejeitos**

As barragens de rejeitos podem ser construídas com material compactado proveniente de áreas de empréstimo, ou com material do próprio rejeito, partículas de granulometria mais grossa, que podem ser separadas pelo processo de cicloneamento.

O método mais comum de disposição dos rejeitos da indústria mineral é o seu lançamento em lagos de decantação (aterros hidráulicos), represados por barragens. A dimensão dessas estruturas foi ampliada nas últimas décadas em razão do aumento na geração de resíduos, impulsionado pela demanda mundial de produtos minerais. Além disso, melhorias técnicas associadas a maiores exigências ambientais têm como resultado o aproveitamento de minérios de baixo teor, o que aumenta a quantidade de rejeitos produzida em relação à massa de alimentação da usina. As técnicas de construção de barragens estão no centro das discussões técnico-científicas, sobretudo a partir dos recentes rompimentos envolvendo essas obras de contenção (THOMÉ; PASSINI, 2018, p. 54).

A constituição física das barragens de rejeitos (Figura 02) permite uma compreensão fácil do seu funcionamento. Elas são compostas por um dique de armazenamento que serve para guardar o rejeito. Os rejeitos são levados para o reservatório por um canal de água ou tubulações que usam sucção. As barragens de contenção de rejeitos são fechadas por terra ou pedras do próprio relevo, e é essencial que o fundo seja revestido com argila impermeável para evitar a contaminação dos solos da mineração e do meio ambiente.

Figura 02- Constituição física de uma barragem de rejeitos



Fonte: Adaptado de Correa *et al.* (2020, p. 24).

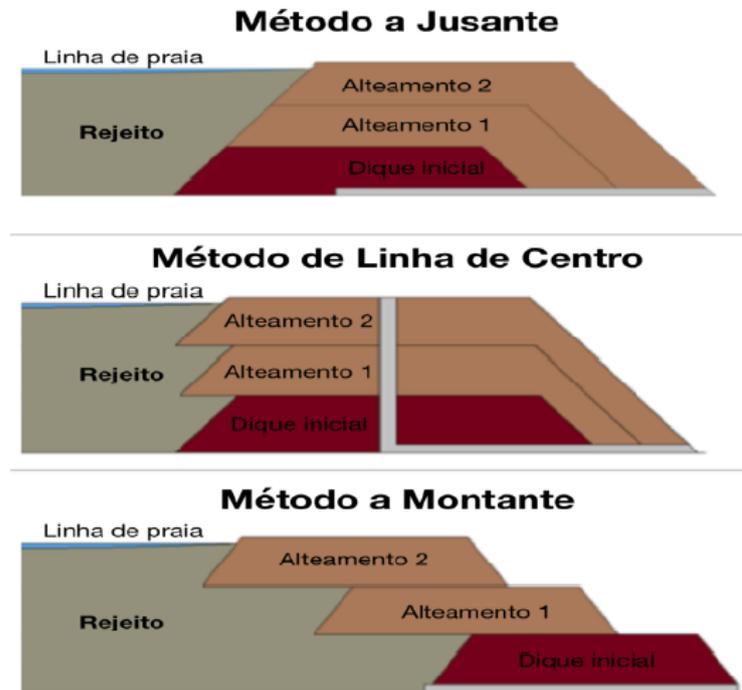
As barragens de rejeitos, frequentemente, são construídas utilizando o método construtivo de alteamento, que consiste na elevação do nível do dique de armazenamento a partir da adição de novas camadas de rejeitos, aumentando sua capacidade de armazenamento. Esse método é considerado essencial para a continuidade do processo de mineração, uma vez que permite o armazenamento seguro dos rejeitos gerados. No entanto, a utilização inadequada desse método pode levar a problemas de estabilidade e segurança da estrutura, exigindo a adoção de técnicas de reforço e monitoramento contínuo.

À medida que o rejeito é depositado na barragem, a parte sólida se acomoda no fundo e ocorre um processo de decantação. A água presente na parte superior da barragem deve ser drenada e tratada para reuso em novos processos de mineração ou devolvida ao meio ambiente em condições adequadas. Conforme a barragem recebe mais rejeito, ela vai gradualmente "secando" até deixar de receber novos depósitos. O ciclo de vida da barragem pode, então, ser estendido por meio da retirada dos rejeitos após secagem ou realizando o alteamento.

Para determinar o método de alteamento, é necessário considerar a disposição do rejeito e a quantidade de água acumulada. Existem três possibilidades de alteamento: o método de montante, o método de jusante e o método da linha de centro (Figura 03). Esses métodos diferem na direção em que são construídos em relação ao dique inicial. À medida que os rejeitos são depositados na barragem, ocorre a

sedimentação das partículas, que é influenciada pelo tamanho e densidade das mesmas.

Figura 03- Método de alteamento das barragens de rejeitos



Fonte: Correa et al. (2020, p. 24)

Com base em Correa *et al.* (2020) e Caitano *et al.* (2021), pode-se observar que o método de alteamento a montante é considerado o mais econômico, porém, é também o menos seguro e mais propenso a rupturas. É importante destacar que este método é o mais utilizado na construção de barragens de mineração no Brasil, como na barragem que rompeu no passado recente em Minas Gerais, causando danos ambientais, sociais e econômicos incalculáveis e expondo a vulnerabilidade das comunidades que vivem nas proximidades dessas estruturas. Desta forma, confirma-se a necessidade de adoção de novos métodos de construção de barragens mais sustentáveis e seguros na mineração, que conciliem as questões econômicas e socioambientais, com a preservação das vidas e do meio ambiente.

O Quadro 01, apresenta uma descrição das principais características de cada método de construção de barragem.

Quadro 01- Tipos de alteamento

TIPOS	CONSIDERAÇÕES
Método Montante	Apresenta-se como a técnica mais antiga, simples e econômica na construção de barragens, sendo que na execução deste tipo de barragem inicia-se pela construção de um dique de partida, normalmente de material argiloso ou enrocamento compactado, onde o rejeito deve ser lançado em direção a montante da linha de simetria do dique, formando assim a praia de deposição, que se tornará a fundação e eventualmente fornecerá material de construção para o próximo alteamento. Exige-se que os rejeitos contenham de 40 a 60% de areia e baixa densidade de polpa, favorecendo a segregação granulométrica. Na sua vida útil, o processo continua sucessivamente até que a cota final prevista em projeto seja atingida. Contudo, salienta-se que este método apresenta fator crítico de sucesso na implantação de um sistema interno de drenagem eficiente para controlar o nível d'água dentro da barragem, o que proporciona problema na estabilidade da estrutura.
Método Jusante	A linha do centro (eixo da barragem) se desloca a jusante durante os processos de alteamentos. Neste método mostra-se necessária a construção de um dique inicial, impermeável, como no método montante, contudo, esse dique inicial deve ser dotado de drenagem interna (filtro vertical e tapete drenante), além de ter seu talude de montante impermeabilizado com argila compactada ou mantas plásticas específicas para impermeabilização. Indicado apenas para rejeitos grossos, podendo ser a barragem projetada para grandes alturas, desde que se incorpore sempre o sistema de impermeabilização e drenagem. Esse método, contudo, necessita de maiores volumes de material para construção, o que demanda maiores custos associados ao processo de ciclonagem ou ao empréstimo de material. Além disto, a área ocupada pelo sistema de contenção de rejeitos também precisa ser muito maior, em função do acréscimo da altura. Cabe salientar, entretanto que esse tipo de estrutura proporciona a execução de barragens de rejeitos de maior porte e com fatores de segurança mais satisfatórios.
Método de linha de centro	Compreende-se esse método como intermediário aos métodos de montante e de jusante. Possui uma estabilidade maior que a barragem alteada somente com o método à montante, e não requerendo um volume de materiais tão significativo como no alteamento somente com o método à jusante. Inicialmente também é construído um dique de partida (dique inicial), onde os rejeitos são lançados perifericamente a montante do mesmo, formando uma praia. O alteamento subsequente é realizado lançando-se os rejeitos sobre a praia anteriormente formada e sobre o talude de jusante do dique de partida. Neste processo, o eixo da crista do dique inicial e dos diques resultantes dos sucessivos alteamentos são coincidentes. Este método, torna-se possível a utilização de zonas de drenagem internas em todas as fases de alteamento, o que possibilita o controle da linha de saturação e promove uma dissipação de poropressões, tornando o método apropriado para utilização inclusive em áreas de alta sismicidade. Suas principais desvantagens são a necessidade de sistemas de drenagem eficientes e sistemas de contenção a jusante, pois a saturação do rejeito compromete a estabilidade do maciço e pela complexidade da operação, os investimentos globais podem ser altos.

Fonte: Adaptado de Sabbo, Assis e Berterquini (2017)

Nas barragens convencionalmente adotadas pela maioria das indústrias da mineração há predominância de material construtivo de terra compactada. Toda a obra normalmente é realizada em etapa única, ou no máximo com dois ou três alteamentos. Salienta-se que a construção por etapas acaba por encarecer o

empreendimento, mostrando-se mais vantajoso o alteamento uma vez que possibilita uma flexibilidade construtiva em função da quantidade de rejeitos que será armazenada gradativamente, adequando-se às oscilações de mercado. No entanto, ao considerar a construção de uma barragem e o processo contínuo de aumento da altura dos rejeitos durante toda a sua vida útil, os custos de construção são diluídos ao longo do tempo.

Em relação ao tipo de alteamento das barragens, Correa *et al.* (2020) expôs que a maioria das barragens foram construídas pelo método de etapa única, contudo, atualmente, muitas barragens não possuem indicação do método construtivo empregado. Ressalta-se, ainda, que as barragens com maiores volumes são alteadas pelo método a montante, um método economicamente mais viável, rápido, porém mais inseguro e proibido pela legislação atual em vigor.

É importante ressaltar que, de acordo com Barcelos, Lage e Cordeiro (2020), as barragens de Fundão em Mariana (MG) e B1 em Brumadinho tinham seu alteamento realizado pelo método a montante.

### **2.2.2 Os riscos das barragens de rejeitos**

Na atividade de mineração, massas e volumes significativos de materiais são extraídos e movimentados dependendo da atividade e processo utilizado. Os impactos negativos decorrentes da mineração não podem mais ser considerados como meros efeitos colaterais inerentes à atividade. Os riscos relacionados à exploração mineral devem ser incluídos nos custos da atividade, com o objetivo de viabilizar indenização concretização de sinistros a pessoas e destruição do meio ambiente.

Devido à longa vida útil das barragens, é crucial que elas sejam conservadas e periodicamente reavaliadas para garantir sua segurança. Como destacado por Correa *et al.* (2020), a ruptura de uma barragem pode causar danos significativos ao meio ambiente, colocar vidas humanas em risco e prejudicar a economia. Portanto, é importante que se dê atenção especial à segurança das barragens. Assim, quanto aos riscos as barragens podem ser classificadas como (Quadro 02):

Quadro 02- Classificação das barragens de mineração de acordo com a categoria de risco e dano potencial associado

Categoria de Risco	Dano Potencial Associado		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	A	B	C
Médio	B	C	D
Baixo	B	C	E

Fonte: Barcelos, Lage e Cordeiro (2020, p.04)

De acordo com a classificação apresentada no Quadro 02, a maioria das barragens brasileiras pertence à classe “B”, tanto em risco, quanto em dano potencial associado. Nessa classe estão inseridos riscos limitados de perda de vida humana; perigo a população escassa ou a infraestruturas não muito importantes. Ressalta-se que a classe “A”, corresponde às barragens consideradas como aquelas de maior risco e dano potencial, mas que atualmente são minoria no Brasil. Nestas barragens identifica-se riscos de perda de vidas humanas; danos em áreas urbanas; perdas importantes de materiais e idade da barragem (BARCELOS; LAGE; CORDEIRO, 2020).

Conforme Amorim *et al.* (2018), compreende-se o risco como sendo os elementos incertos às expectativas, que afetam constantemente o alcance dos objetivos, das metas e das propostas estratégicas (pessoas, processos, informação e comunicação), provocando influência sobre o ambiente com potencial de proporcionar prejuízos aos envolvidos. Salientam, entretanto, que o risco pode ser gerenciado, e quando controlado, cria oportunidades, inclusive de ganhos financeiros, de reputação e de relacionamento.

No cenário do risco estão presentes os aspectos do ambiente da organização, do projeto organizacional em si e da atividade, normalmente relacionados às práticas imaturas, ausência de sistemas integrados de gestão, negligência, imperícia e imprudência, bem como dependência de participantes externos que estão fora do controle direto da organização.

A gestão de riscos tornou-se uma prática aconselhável para a manutenção do controle das variáveis que impactam em sinistro, bem como por ser alicerce à tomada de decisões, fundamentadas em cenários de incertezas e mudanças. Salienta-se que as barragens de rejeitos demandam fiscalização, monitoramento e adequada gestão para que atenda aos requisitos primordiais à segurança. A falta de monitoramento

pode elevar os riscos de falhas e sinistros potencialmente fatais, mostrando ser de suma importância o acompanhamento dessas estruturas de forma a prevenir e corrigir possíveis anomalias a fim de evitar acidentes. Barcelos, Lage e Cordeiro (2020) destaca a importância do monitoramento dessas estruturas, uma vez que maiores volumes implicam em maiores riscos e possíveis danos associados no caso de um colapso.

Cabe salientar que a avaliação do risco se mostra primordial para o aspecto de prevenção. A superação das dificuldades na manutenção e controle da utilização das barragens perpassa pela adoção de novas tecnologias e métodos que possam, gradualmente, além de diminuir a quantidade de rejeitos gerada ou até mesmo substituir, futuramente, os aterros hidráulicos, avisar com segurança sobre o risco de potencial agravado para sinistro a fim de prevenir danos a pessoas e ao meio ambiente. Conforme exposto por Marshall (2017), as empresas falham em desconsiderar os alertas, não ter preparo para resposta aos desastres e minimizar a gravidade dos desastres.

As ações de segurança devem contemplar ações multidisciplinares, ou seja, engenheiros tem que trabalhar em conjunto, para a redução de incertezas, ainda que nem toda falha de barragem possa ser evitada. Segundo Correa *et al.* (2020) a implantação de sistemas de gestão, procedimentos operacionais, técnicas e metodologias de monitoramento são ferramentas úteis para gerenciar os riscos de falhas nas barragens.

Pode ser verificado, nos últimos anos, acidentes em barragens de contenção de rejeitos, o que evidenciou fragilidades significativas na manutenção e monitoramento dessas estruturas por parte das empresas mineradoras e a necessidade de melhorar os modelos de gestão de segurança dos ambientes de mineração, sobretudo no aspecto de prevenção por parte das empresas mineradoras. Assim, programas de segurança de barragens entraram em evidência, tanto para as empresas, como para a para toda a sociedade.

### **2.2.3 Legislação para barragens de rejeitos**

Abu-El-Haj (2020) salienta que fiscalização da segurança de barragens de rejeitos de mineração no Brasil é competência da Agência Nacional de Mineração – ANM, agência reguladora federal recém-instalada, em 2018, em substituição ao antigo

Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, que fundamenta a ação na Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB, instituída pela Lei nº 12.334, de 2010. Contudo, a responsabilidade legal pela segurança da barragem é do empreendedor com direito real sobre as terras onde se localizam a estrutura e o reservatório ou que explore a barragem.

A resolução nº 13, de 8 de agosto de 2019, artigo 7º, regulamenta que as barragens de mineração necessitam ter um Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração – PAEBM, contando com sistemas automatizados de acionamento de sirenes instaladas fora da mancha de inundação e outros mecanismos adequados ao alerta eficiente na Zona de Autossalvamento – ZAS, instalados em lugar seguro, e dotados de modo contra falhas em caso de rompimento da estrutura, complementando os sistemas de acionamento manual no empreendimento e o remoto (ANM, 2023).

O PAEBM deve ser estruturado em um documento técnico e de fácil entendimento elaborado pelo empreendedor no qual estão identificadas as emergências em potencial da barragem, estabelecendo as ações a serem executadas nesses casos e definidos os agentes a serem notificados, com o objetivo de minimizar danos e perdas de vida.

A Zona de Autossalvamento (ZAS) refere-se à área localizada a jusante da barragem, onde os alertas à população são de responsabilidade do empreendedor. Essa região é considerada crítica, pois não há tempo suficiente para uma intervenção imediata das autoridades competentes em caso de emergência decorrente de eventos adversos que possam comprometer a integridade estrutural e operacional da barragem, bem como a preservação da vida, saúde, propriedade e meio ambiente. Para delimitar a ZAS, deve ser considerada a maior das seguintes distâncias: 30 minutos de tempo de chegada da onda de inundação ou 10 km de distância. Essas determinações são estabelecidas pela ANM (2023).

Para os casos em que a mancha de inundação seja demasiadamente larga ou em outros casos excepcionais em que não seja possível a instalação das sirenes fora da mancha de inundação, estas podem ser instaladas dentro da citada mancha desde que devidamente justificado pelo projetista no PAEBM. Os sistemas de alerta de acionamento automático e manual mencionados devem ser projetados e implementados de acordo com as diretrizes da Portaria DNPM nº 70.389, de 17 de maio de 2017, levando em consideração as características específicas da barragem

e os critérios de acionamento baseados em parâmetros de deformação e deslocamento. Tais limites devem ser definidos pelo projetista da barragem, sendo que o prazo para a implementação do sistema automatizado estabelecido até 15 de dezembro de 2020. Caso as exigências mencionadas não sejam atendidas dentro do prazo determinado, a barragem deverá ser interditada até que os requisitos sejam cumpridos, conforme determina a ANM (2023).

No Brasil, a segurança das barragens de rejeitos está sujeita a legislação específica apresentada no (Quadro 03):

Quadro 03- Legislação de segurança das barragens de rejeitos no Brasil

<b>Linha do Tempo</b>	<b>Eventos e Legislação</b>	<b>Considerações</b>
<b>2010</b>	<b>Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010</b>	Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB).
<b>2015</b>	<b>Rompimento da Barragem do Fundão</b>	Rejeitos de minério de ferro da Samarco Mineração S/A (Mineradora Vale S/A e anglo-australiana BHP Billiton) no município de Mariana-MG.
<b>2017</b>	<b>Portaria ANM nº 70.389 De 17 de maio de 2017</b>	Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração (CNBM), o Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens de Mineração (SIGBM) e estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração (PAEBM), conforme art. 8º, 9º, 10, 11 e 12 da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010.
<b>2019</b>	<b>Rompimento da Barragem do Córrego do Feijão</b>	Rejeitos de minério de ferro da Mineradora Vale S/A no município de Brumadinho-MG.
<b>2019</b>	<b>Resolução ANM nº 13 de 08 de agosto de 2019</b>	Estabelece medidas regulatórias objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado "a montante" ou por método declarado como desconhecido.
<b>2020</b>	<b>Resolução ANM nº 32 de 18 de maio de 2020</b>	Altera a Portaria nº 70.389, de 17 de maio de 2017.
<b>2020</b>	<b>Resolução ANM nº 40 de 06 de julho de 2020</b>	Altera o artigo 7º da Portaria nº 70.389, de 17 de maio de 2017.
<b>2020</b>	<b>Lei nº 14.066 de 30 de setembro de 2020</b>	Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração)
<b>2020</b>	<b>Resolução ANM nº 51 de 29 de dezembro de 2020</b>	Cria e estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento da Avaliação de Conformidade e Operacionalidade do PAEBM - ACO, que compreende o Relatório de Conformidade e Operacionalidade do PAEBM - RCO e a Declaração de Conformidade e Operacionalidade do PAEBM - DCO.
<b>2021</b>	<b>Resolução ANM nº 56 de 29 de janeiro de 2021</b>	Altera dispositivos da Resolução nº 51, de 24 de dezembro de 2020, publicada em 29 de dezembro de 2020.

Fonte: Adaptado de Caitano *et al.* (2021)

Destaca-se, conforme exposto por Barcelos, Lage e Cordeiro (2020), que a Resolução da Agência Nacional de Mineração (ANM), nº 13/2019 proibiu a construção ou alteamento de barragem pelo método a montante em todo o território brasileiro, porém ainda existem muitas barragens deste tipo em operação.

Cabe salientar que apesar da criação de normas jurídicas com foco em regulamentar o funcionamento e a segurança das barragens na mineração, como a Lei 12.334/2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens, acidentes continuam a ocorrer (THOMÉ; LAGO, 2017).

As recentes ocorrências envolvendo barragens de contenção de rejeitos de mineração e seus graves impactos ambientais e sociais têm evidenciado para a sociedade e para as empresas a necessidade urgente de reavaliar práticas de gestão, segurança, planejamento e inovação tecnológica para essas estruturas. Apesar dos esforços das empresas mineradoras em cumprir a legislação vigente e garantir a segurança de suas barragens, é imprescindível aprimorar medidas e ações para prevenir a ocorrência de acidentes.

### **2.3 Manutenção industrial: do planejamento ao controle das barragens de rejeitos da indústria mineradora**

A manutenção na atividade industrial, segundo Lima (2020), refere-se à combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em estado no qual possa desempenhar uma função requerida. A manutenção é uma atividade crucial para as organizações, uma vez que ela tem a responsabilidade de garantir que a capacidade produtiva seja mantida em seu melhor estado possível, de acordo com as necessidades e exigências do processo produtivo. A falta de uma gestão efetiva da manutenção aumenta significativamente a probabilidade de ocorrerem falhas e problemas no processo produtivo, o que pode resultar em custos elevados com intervenções corretivas.

[...] a missão da manutenção é garantir a disponibilidade da função dos equipamentos e instalações de modo a atender a um processo de produção ou de serviço com confiabilidade, segurança, preservação do meio ambiente e custos adequados [...] a manutenção deve ser encarada como uma função estratégica na obtenção dos resultados da organização e deve estar direcionada ao suporte das atividades de gestão e de solução de problemas apresentados na produção, lançando a empresa em patamares competitivos de qualidade e produtividade (VIANA; RIBEIRO, 2017, p. 03).

A manutenção, segundo Farahani e Tohidi (2021), inclui todos os aspectos técnicos e atividades gerenciais durante a vida útil de um equipamento/sistema, tendo objetivo de manter ou restaurar o equipamento para que ele possa fornecer a tarefa esperada com o nível de qualidade aceitável.

A falta de manutenção, conforme exposto por Farahani e Tohidi (2021), tem potencial de modificar o cronograma de produção em uma emergência que geralmente impõe, também, elevação de custo ao sistema. Dessa forma, pode-se compreender, que a manutenção tem potencial de reduzir a variação do processo e ajudar a aumentar produtividade industrial. A adoção pelo método de manutenção dependerá dos custos envolvidos, sendo evidente que a manutenção tardia aumentará a variabilidade do processo (KUMAR; LAD, 2017).

Segundo Wan *et al.* (2018), a importância na manutenção industrial se deve à sua funcionalidade, a base da qualidade exigida pelos clientes e pela sociedade. Pode acontecer de forma programada com base em planejamento e controle, e provavelmente com custos mais reduzidos; ou, de forma não programada, normalmente tem caráter corretivo e/ou preditivo. Quando corretivo acontece com sinistros inesperados, ocorridos de repente, demandando ações urgentes, normalmente o tipo mais caro de manutenção. Quando preditivos, permite maior controle, pois, inclui prever falhas e planejar ações de manutenção com antecedência em relação à situação de produção atual e custos mais acessíveis.

O planejamento e controle da manutenção, segundo Vitonto e Regattieri (2021), objetiva elaborar informações para a tomada de decisão, quanto ao desempenho dos equipamentos/sistemas para atender às necessidades da empresa.

O papel principal do planejamento da manutenção está em auxiliar a tomada de decisão, fundamentado em informações, que reúne em si, diversas variáveis que influenciem em todos os níveis de decisão da manutenção, pois, a operacionalização da manutenção precisa ser coerente com as políticas gerais adotadas pela organização.

A partir de um controle eficiente e eficaz pode-se adotar uma política de manutenção flexível às necessidades circunstanciais da empresa, não perdendo de vista a produtividade e a lucratividade. O planejamento adequado, pode conduzir a uma redução significativa no número problemas.

O planejamento, controle e programação da manutenção otimiza o desempenho das instalações produtivas, evitando falhas, minimizando a perda de produção de uma organização. Tendo o objetivo de minimizar a perda de tempo produtivo à falha do equipamento, estender a vida útil do maquinário e outras instalações, minimizando desgaste, como a perda devida a paradas de produção, assim garantindo a prontidão operacional de todos os momentos, a eficiência do equipamento na utilidade de manutenção e pessoal, assegurando a inspeção regular e manutenção de instalações [...] (LIMA, 2020, p. 4).

De forma geral, o planejamento e controle da manutenção direciona a prática para as diretrizes requeridas para determinado setor por uma empresa. Sua atuação proporciona melhoria continuada dos métodos próprios da empresa, a fim de satisfazer o objetivo de uma produção eficiente e sem a ocorrência de imprevistos desastrosos.

Cabe salientar que não há um modelo de planejamento e controle da manutenção que atenda a todo o cenário demandado, pois, conforme exposto por Araújo (2017), o planejamento da manutenção constitui uma ferramenta de qualidade voltada para o posicionamento da gestão das atividades do departamento de manutenção. Envolve a organização das tarefas da manutenção fundamentada nas informações produtivas da organização. Assim, os engenheiros e gestores necessitam de informações adequadas para embasar a manutenção e permitir um planejamento adequado para o momento em que o serviço se faça necessário. É crucial buscar melhores práticas, métodos e ferramentas, especialmente para a análise de erros e falhas, uma vez que a ausência dessas informações pode acarretar intervenções corretivas que oneram significativamente os custos envolvidos.

Cada empresa deve realizar adaptações aos modelos tradicionais para atender às suas necessidades de manutenção. Ressalta-se ainda, que o planejamento e controle da manutenção demanda a criação de uma cultura forte em prevenção de sinistros, o que pode, interferir nos hábitos ou costumes já enraizados na organização, sendo necessário para superação dos vícios organizacionais, treinamentos, capacitação e fiscalização para melhores resultados.

Dentre as vantagens do planejamento e controle da manutenção apontados por Vitonto e Ragattieri (2021) estão a redução de falhas e momentos operacionais críticos, a restrição de investimentos desnecessários em máquinas e equipamentos, a utilização do máximo de equipamentos/sistemas instalados, melhoria da taxa de utilização dos equipamentos envolvidos, a garantia do alcance da qualidade proposta, a redução da mão-de-obra de baixo custo, o aproveitamento de todo o potencial dos

equipamentos, a melhoria nos métodos de utilização dos equipamentos/sistemas e prejuízos legais com sinistros. Contudo, salientam que apesar das vantagens em se adotar um planejamento e controle de manutenção eficaz, muitas empresas ainda negligenciam a manutenção, sobretudo, com a desculpa da demanda de tempo e custos, apontando que não há tempo disponível suficiente para um planejamento mais elaborado.

No planejamento de manutenção, é fundamental que a programação seja feita para evitar falhas nos equipamentos. No caso das barragens, é importante compreender que essas estruturas não estão imunes a problemas e necessitam de manutenção preventiva, uma vez que os sinistros com perda de vidas são um risco real. Além disso, uma parada não planejada pode interromper a produção e comprometer a competitividade da empresa no mercado, sem contar o risco de perda de vidas humanas em um cenário pessimista de sinistro.

Considera-se essencial que a gestão da manutenção seja realizada de forma proativa, evitando problemas e garantindo a segurança de todos os envolvidos. Assim, o planejamento e controle de manutenção, aqui especificamente relacionados a questão das barragens de rejeitos, apresenta-se como o melhor equilíbrio entre o custo de manutenção e os custos operacionais relacionados a continuidade da atividade mineradora.

As tarefas de manutenção incluem uma série de atividades essenciais, tais como planejamento, controle, reparos, calibração e testes. Embora possam ser dispendiosas em alguns casos, é fundamental que as empresas mineradoras invistam em sistemas cada vez mais efetivos para garantir a segurança na atividade industrial. Isso se deve ao risco envolvido na mineração e ao potencial destrutivo dos sinistros, o que pode acarretar perdas significativas tanto para as empresas quanto para a sociedade em geral. Portanto, a gestão da manutenção deve ser tratada com seriedade e atenção, visando à prevenção de falhas e à garantia da segurança nas operações.

### **2.3.1 Aspectos da manutenção**

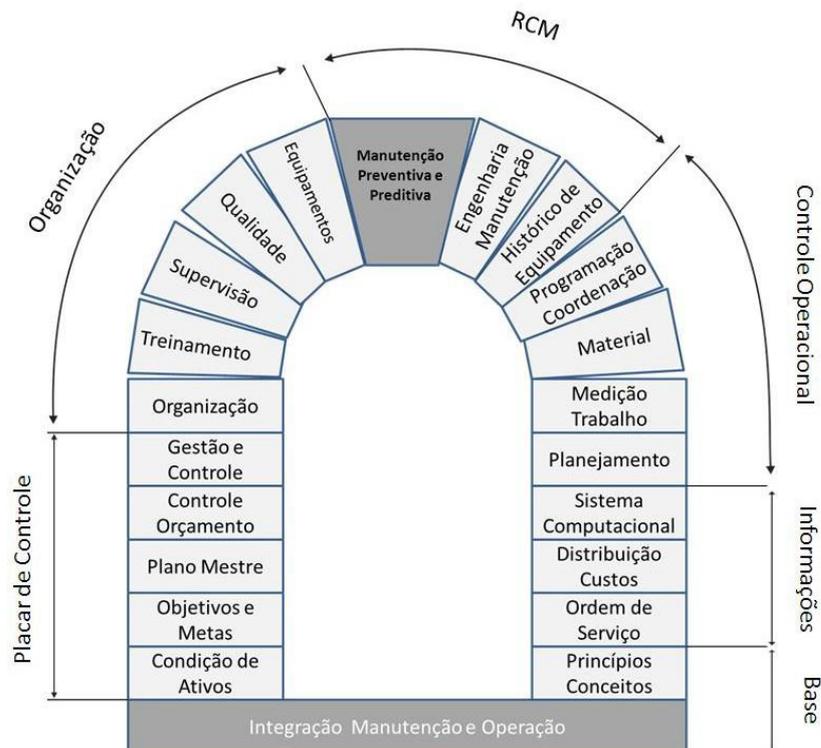
A manutenção pode ser realizada de diversas formas diferentes, sendo apresentada principalmente nos seguintes tipos:

**Manutenção Reativa ou Corretiva:** corrigir falhas que já tenham ocorrido;  
**Manutenção Preventiva:** prevenir e evitar as consequências das falhas;  
**Manutenção Preditiva:** previsão ou antecipação da falha; medindo parâmetros que indiquem a evolução de uma falha a tempo de serem corrigidas;  
**Manutenção Proativa:** otimizar o processo e o projeto de novos equipamentos, em uma atitude proativa de melhoria contínua;  
**Manutenção Produtiva:** garantir a melhor utilização e maior produtividade dos equipamentos;  
**Manutenção Detectiva:** identificar falhas que já tenham ocorrido, mas que não sejam percebidas. (VITONTO; REGATTIERI, 2021, p.548).

É importante destacar que embora a manutenção seja comumente associada à manutenção de máquinas, os procedimentos de manutenção não se limitam a equipamentos. De acordo com Lima (2020), a manutenção também está relacionada a operações, projetos e sistemas operacionais, pois a restauração da funcionalidade desses elementos exige a observância de critérios que, se falhos, podem prejudicar ou até mesmo inviabilizar futuras operações.

De acordo com Viana e Ribeiro (2017), a manutenção pode ser organizada com base na gestão da manutenção, como apresentado na Figura 04. Conforme demonstrado nesta figura, a base da manutenção requer a integração entre os setores de Manutenção e Operação, com base nos princípios e conceitos do negócio.

Figura 04- Organização das práticas da manutenção



Fonte: Viana e Ribeiro (2017, p. 06)

Essa integração está diretamente relacionada ao sistema computacional disponível para a análise das informações, aos custos envolvidos e ao histórico de manutenção, como, por exemplo as ordens de serviço. Neste cenário o Controle Operacional envolve o planejamento, medição, equipamentos/sistemas de manutenção e a programação. O RCM (*Reliability-centered Maintenance* - Manutenção Centrada na Confiabilidade), por sua vez, está associada ao histórico de manutenção, a engenharia e as manutenções preventiva e preditiva.

Identificar o motivo das falhas e planejar antecipadamente a manutenção exige examinar de forma sistemática as instalações, sendo fundamental, inclusive, para a segurança dos colaboradores, o aumento da confiabilidade e a qualidade e otimização dos custos operacionais. Considera como base de todo o sistema de manutenção, a manutenção preventiva e a manutenção preditiva, tendo as iniciativas direcionadas para alicerçar a gestão da manutenção em seu processo básico de realização de serviços antes da ocorrência da falha, o que confere ao planejamento avanço e sustentabilidade.

Falta de fundamentação das ações e resistência das práticas existentes comprometem a manutenção, principalmente a preventiva, contribuindo para sinistros com letalidade potencial no ramo minerador. Apesar da complexidade que envolve a atividade mineradora, há que se atentar que os lucros para as empresas não se resumem apenas à função produzir. A manutenção adequada dos sistemas correlatos, como a manutenção das barragens, pode se tornar fator crítico de sucesso, podendo, inclusive, inviabilizar a atividade produtiva, e por isso demandam atenção. Para que a empresa atinja a excelência na manutenção mostra-se necessário o engajamento e colaboração de todos, através da formação de equipes em áreas específicas e adoção de ferramentas que proporcionem análise conjunta de falhas, problemas crônicos, desempenho de equipamentos, planejamento de serviços e até na programação diária.

Conforme destacado por Mourtzis et al. (2017), nos últimos anos, o controle da manutenção tem buscado soluções para aumentar a confiabilidade do sistema, reduzindo os riscos associados. Uma das estratégias implementadas é o uso de sistemas de monitoramento da condição da máquina/sistema para melhorar a gestão da manutenção. Com base na entrada de Redes de Sensores Sem Fio (WSN), tornou-se possível acompanhar o tempo entre as falhas das máquinas-ferramentas. Esses sistemas têm contribuído significativamente para aumentar a eficiência da

manutenção e facilitar a prestação de serviços. A união tecnologia e instrumentos de monitoramento, por meio da evolução dos sistemas de comunicação e informática, tem permitido a captação de dados e auxiliado os gestores/operadores a lidar com a manutenção. Através da análise das informações/dados coletados em um sistema, pode-se criar instruções de manutenção mais adequadas.

A conexão de informações ao longo de uma linha de tempo permite a observação de aspectos específicos de um sistema, aqui no caso, uma barragem de rejeitos, melhorando as instruções de manutenção. Para melhoria do processo de manutenção dentro das mineradoras, segundo Glawar *et al.* (2018) as empresas enfrentam o desafio de modelar seus processos de produção de forma mais flexível, versátil e orientado para o cliente, para se manter competitivo. Nesse processo sofrem com a complexidade das instalações e com a pressão de custos.

Avaliar adequadamente o tipo de manutenção a adotar mostra-se essencial para evitar o colapso/desligamento de todo sistema. Supõe-se, conforme exposto por Glawar *et al.* (2018) que a condição da máquina/sistema é estocasticamente determinável e, portanto, o número das operações de manutenção necessárias dentro de um período de planejamento, pode ser calculado com base na idade do sistema, permitindo a criação de um modelo que considera o número de operações de manutenção necessárias como bem como a condição da máquina/sistema em termos de confiabilidade, permitindo melhor planejamento e controle, além de ser uma ferramenta eficiente para medir o desempenho.

### **2.3.2 Especificidades da manutenção nas barragens de rejeitos**

A manutenção das barragens de rejeitos requer a utilização de mecanismos tecnológicos e fiscalização física para garantir sua operacionalização segura. Nesse sentido, ferramentas de análise computacional fornecem informações valiosas sobre o desempenho da barragem e podem emitir alertas preventivos em caso de qualquer problema que possa surgir, permitindo a adoção de iniciativas preventivas e minimização de riscos.

[...] no caso das barragens de rejeitos a atenção primeira deveria estar voltada para a análise dos riscos que essas estruturas representam, não só para os danos ao meio físico (ar, águas e solo) e ao meio biótico (fauna e flora), mas também para as comunidades a jusante, pois as consequências de um rompimento com perdas de vida e de bens imateriais são impactos irreversíveis (RIBEIRO; SILVA, 2018, p. 124).

O monitoramento de estruturas e barragens, segundo Zucheratto Jr. (2021), torna-se, assim, essencial para as empresas de mineração e órgãos fiscalizadores, por serem vitais para a segurança do projeto e solidez da barragem a longo prazo. A detecção precoce de defeitos e anormalidades se mostra como uma etapa imprescindível para a avaliação da integridade das barragens, monitoramento da estrutura e gerenciamento de risco geral. Simular o comportamento de uma barragem oferece precisão sobre diversos parâmetros, como deslocamentos, níveis d'água, poro-pressão, vazões, entre outros que concorrem para a ocorrência de sinistros fatais. Neste processo múltiplos equipamentos instrumentais e ferramentas informatizadas devem ser utilizados.

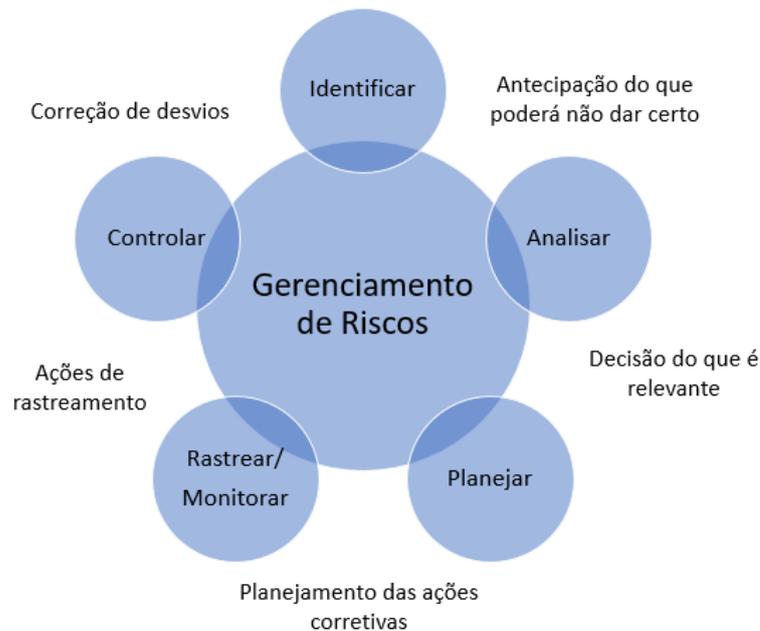
Com foco na manutenção preventiva, os seguintes aspectos devem ser investigados para evitar desastres nas barragens e atestar a segurança:

- Materiais de Construção: concreto, rochas, solo, cimento, metais, madeira, revestimentos, borrachas e seladores de juntas.
- Condições gerais que evidenciam perigo: cavitação, infiltração, vazamentos, drenagem, ação do gelo, instabilidade e tensão / deslizamento.
- Deficiências de operação e manutenção: equipamentos elétricos e mecânicos, acessibilidade e visibilidade, crescimento de plantas e animais que fazem tocas, tensão / deslizamento, instabilidade, infiltração e descontinuidade de juntas e fundação.
- Evidências de deficiências em barragens de material solto: tensão / deslizamento, instabilidade, vazamentos, erosão, fundação e riscos de ruptura nos equipamentos e estruturas associadas.
- Evidência de deficiências em vertedores: estrutura hidráulica de controle, canal de aproximação, comportas, pontes, conduto de descarga, estruturas terminais, canais de restituição, plataformas operacionais e guindastes, poços, condutos e túneis.
- Evidências de deficiências nas saídas d'água: canais de aproximação, estruturas de tomada d'água, câmaras das comportas, comportas, válvulas, guindastes, controles, equipamentos elétricos e dutos de ar, estruturas terminais, canais de restituição e plataformas de resíduos.
- Condições adversas no entorno do reservatório: reservatório, taludes do reservatório, proximidade a jusante, curso d'água e entorno regional (CORREA *et al.*, 2020, p. 25-26).

Zucheratto Jr. (2021) sugere a importância de identificar, analisar, planejar, monitorar e controlar as variáveis de funcionamento das barragens, como apresentado no fluxograma da Figura 05 que descreve o processo de identificação, análise, planejamento, monitoramento e controle das variáveis de risco das barragens. Na etapa de identificação, é possível estabelecer os componentes de risco. Na análise, avalia-se a probabilidade de cada elemento de risco e as consequências associadas. No planejamento, determinam-se as estratégias gerais para minimizar a probabilidade de risco. No monitoramento, medem-se e atualizam-se continuamente

todas as variáveis que podem indicar risco. Finalmente, no controle, são tomadas várias ações para reduzir o risco identificado. Seguir essas etapas pode ajudar a garantir a segurança das barragens e minimizar os riscos associados.

Figura 05- Fluxograma da gestão de risco da barragem de rejeitos



Fonte: Adaptado de Zucheratto Jr. (2021)

Conforme destacado por Zucheratto Jr. (2021), a utilização de múltiplos equipamentos, instrumentos e técnicas numéricas e estocásticas, como o Método Monte Carlos, por exemplo, permite aprimorar o monitoramento das barragens e sua gestão de risco, podendo reduzir, assim, significativamente sua exposição ao sinistro.

## 2.4 Considerações finais

No presente capítulo foi abordada a atividade de mineração no Brasil, com ênfase nas barragens de rejeitos, relacionando-as aos riscos e às exigências legais para seu uso e manutenção. Destacou-se a importância da prevenção, tendo em vista os sinistros potencialmente letais relacionados às barragens que têm ocorrido recentemente. Além disso, foram discutidos os meios de manutenção necessários para garantir a segurança das barragens e minimizar os riscos associados.

### 3 DESCRIÇÃO GERAL DO MÉTODO DE MONTE CARLO

Nesse capítulo são apresentados o histórico, aplicações, a base teórica e a modelagem matemática geral do Método Monte Carlo.

#### 3.1 Definição do método Monte Carlo

O Método de Monte Carlo, de acordo com Yoriyaz (2009), pode ser descrito como um método estatístico, que utiliza uma sequência de números aleatórios para a realização de uma simulação. O método consiste em estimar determinadas quantidades, observando o comportamento de um número grande de eventos individuais. Segundo Oliveira, Paiva e Paiva (2019), a técnica fundamenta-se em bases estatísticas e probabilísticas, podendo ser descrito como a utilização de um processo aleatório que, baseado em distribuições de probabilidade, permite a determinação de um novo conjunto de valores.

Em uma abordagem mais completa, o método, por meio da associação de valores aleatórios à problemas reais, com foco na busca de soluções viáveis, permite um agrupamento genérico de técnicas de probabilidade e amostragem que podem ser utilizadas na resolução de problemas de caráter complexo. A ideia central do método apresenta-se como um conceito de natureza simples podendo ser aplicado para a solução de diferentes tipos de problemas.

Sendo uma ferramenta estatística, o método utiliza simulação para apropriar-se das propriedades de distribuições de variáveis aleatórias. A partir da simulação de um fenômeno que contém alguns componentes aleatórios, é possível fazer inferências sobre as populações originais. Com os avanços significativos das ferramentas de processamento de dados da informática, esse método tem assumido especial relevância nos últimos tempos. Assim, ele tem sido amplamente utilizado em problemas que não permitem a obtenção de um resultado analítico ou que apresentam muita complexidade.

A simulação de Monte Carlo é um processo matemático computadorizado que possibilita levar em conta o risco em análises quantitativas e tomadas de decisão. Esse processo é utilizado por diversos profissionais em uma variedade enorme de campos, tais como finanças, gerenciamento de projetos, energia, indústrias, engenharia, pesquisa e desenvolvimento, seguros, petróleo e gás, transportes e meio ambiente. Esta técnica fornece ao responsável pela tomada de decisão uma gama de resultados possíveis e as probabilidades de ocorrências desses resultados de acordo com a ação

escolhida como decisão. Ela procura mostrar as possibilidades extremas, os resultados das decisões mais ousadas, as mais conservadoras, e todas as possíveis consequências das decisões mais moderadas (MARTINS, 2022, p.433).

Conforme exposto por Saraiva Jr, Tabosa e Costa (2011), o método surgiu no Projeto Manhattan do laboratório de armas nucleares Los Alamos, Estados Unidos, durante a Segunda Guerra Mundial, sendo desenvolvido pelos cientistas John Von Neumann e Stanislaw Ulam, ganhando o nome “Monte Carlo” em referência aos jogos de azar que fazem uso constante de sorteios e de dados, uma atração popular na cidade de Monte Carlo, Mônaco.

Métodos Monte Carlo nasceram em Los Alamos, Novo México, durante a Segunda Guerra Mundial, maioria dos físicos que trabalham com física matemática e com a bomba atômica.

- Os métodos de Monte Carlo regulares (somente MC), são geralmente rastreados para Ulam e von Neumann no final da década de 1940. *Stan Ulam, John Von Neumann, and the Monte Carlo method*, descreve esses primeiros desenvolvimentos de Monte Carlo.
- Stanislaw Ulam associa a ideia original a um compute combinatório intratável que ele tentou em 1946: calcular a probabilidade de ganhar no jogo de cartas de paciência.
- Esta ideia foi adotada por John von Neumann para implementação com aplicações diretas à difusão de neutrões, sendo o nome “Monte Carlo” sugerido por Nicholas Metropolis.
- O surgimento do primeiro computador digital, o ENIAC (fevereiro de 1946). O método de Monte Carlo foi criado por von Neumann, que o utilizava em problemas termonucleares e de fissão em 1947. Nesse mesmo ano, Ulam e von Neumann inventaram técnicas de inversão e aceitação-rejeição, para simular amostras de distribuições não uniformes. Note também que, já em 1949, um simpósio sobre Monte Carlo foi apoiado por Rand, o National Bureau of Standards, e o laboratório de Oak Ridge e que Metropolis e Ulam, publicaram o primeiro artigo sobre o método de Monte Carlo (LUNA, 2022, p.05).

Em diversas áreas e setores, a incerteza dos parâmetros envolvidos em uma análise é um fator crítico para garantir a compreensão geral do processo e de seus resultados. Segundo Barbosa, Freitas e Neves (2005), a incerteza pode aumentar o risco da estrutura ou sistema não atender aos objetivos desejados e estabelecidos, evidenciando, assim, a importância de compreender a probabilidade envolvida para prevenir possíveis falhas. A determinação de probabilidade pode ser realizada empregando diferentes métodos, dentre os quais se desta o método Monte Carlo que utiliza amostragem artificial para experimentos aleatórios, permitindo, assim, conhecer as distribuições probabilísticas das variáveis.

De acordo com Saraiva Jr, Tabosa e Costa (2011), o método Monte Carlo tem sido amplamente empregado como ferramenta de apoio em problemas de tomada de

decisão que envolvam risco e incerteza. Esse método é particularmente útil em situações em que o comportamento das variáveis envolvidas não é determinístico.

Para Paula (2014) o método Monte Carlo tem ampla aplicabilidade, sendo muito comum sua utilização em áreas, como Finanças, na modelagem e simulação de um mercado de opção; na Engenharia, normalmente como suporte à gestão, análise de problemas, na Biologia, na busca de estratégias de otimização dos resultados obtidos, e em outros, como a Física, a Química e a Medicina.

### **3.2 Descrição metodológica do método de Monte Carlo**

De forma geral, o método de Monte Carlo utiliza a geração de números aleatórios para atribuir valores às variáveis do sistema que se deseja investigar. Os números são obtidos de artifícios aleatórios, normalmente de tabelas ou diretamente de softwares, através de funções específicas. A cada interação, o resultado fica armazenado e, ao final de todas as repetições, a sequência de resultados gerados é transformada em uma distribuição de frequência que possibilita calcular estatísticas descritivas, como média (valor esperado), valor mínimo, valor máximo e desvio-padrão, podendo assim o executor das simulações projetar e prever cenários futuros de operação do sistema em análise.

De acordo com Martins (2022), o Método Monte Carlo oferece diversas vantagens, como a possibilidade de lidar com sistemas complexos que não podem ser adequadamente tratados por técnicas analíticas, permitindo a simulação desses sistemas. Além disso, o método oferece um maior controle sobre as condições experimentais do que seria possível na experimentação no sistema real. A utilização de suporte computacional permite que a experimentação ocorra em um curto período de tempo e a análise de dados é facilitada pelos pacotes de softwares disponíveis no mercado, que oferecem alta capacidade gráfica para a simulação e demonstração dos modelos.

No entanto, é importante ressaltar que a aplicação do Método Monte Carlo pode apresentar alguns fatores críticos que podem se tornar desvantagens, tais como o alto custo de aquisição de softwares específicos, a necessidade de contratação de profissionais para a construção do modelo matemático e computacional e a necessidade de uma quantidade significativa de dados para a simulação.

O método de Monte Carlo, segundo Yoriyaz (2009) e Vargas e Cruz-Carpio (2020), apresenta-se como uma ferramenta matemática para resolver problemas, onde ocorram relações e interações de diferentes variáveis e seu ambiente, por meio de a geração aleatória dessas interações. Quanto maior a repetição dos testes, mais o resultado converge para um valor com maior precisão.

O Método Monte Carlo pode ser desenvolvido a partir das etapas descritas no Quadro 04:

Quadro 04- Passos para operacionalização da simulação Monte Carlo

PASSO	DESCRIÇÃO
1	Definir as variáveis envolvidas no sistema em análise com base nos dados passados ou em estimativas sugestivas dos administradores.
2	Construir distribuições de frequência (absoluta, relativa e acumulada) para cada uma das variáveis definidas.
3	Definir para cada variável considerada os intervalos de classe, incidência dos números aleatórios, com base nas distribuições de frequência acumulada projetada.
4	Gerar números aleatórios.
5	Incidir números aleatórios gerados nos intervalos de classe de cada variável.
6	Simular os experimentos.

Fonte: Adaptado de Saraiva Jr; Tabosa e Costa (2011)

Em grande parte dos problemas práticos que utilizam o método de Monte Carlo, o processo físico é simulado sem o emprego da modelagem matemática o representa. Sendo então, esse processo descrito por meio de funções de densidade de probabilidade de valores das variáveis envolvidas.

A Figura 06, apresenta o fluxograma simplificado de aplicação do método de Monte Carlo.

Figura 06- Fluxograma simplificado do processo de simulação do Método Monte Carlo



Fonte: Adaptado de Yorivaz (2020)

As simulações estatísticas, de acordo com Yoriyaz (2009), contrastam com métodos convencionais de discretização, que são tipicamente aplicados em sistemas de equações diferenciais parciais ou ordinárias que descrevem o processo físico.

Conforme Luna (2022), a simulação de uma variável aleatória consiste em gerar ou amostrar, via algum algoritmo computacional, uma sequência de observações desta variável.

A simulação de um sistema é a operação de um modelo que representa esse sistema, geralmente em computadores, respeitando-se todas as regras e condições reais a que o sistema está submetido. O modelo permite manipulações que seriam inviáveis no sistema real que ele representa, por causa do custo ou da impossibilidade de realizá-las. A simulação sempre foi usada pela humanidade como meio de representar processos relativos aos sistemas em que as pessoas viviam. Nesse caso, incluem-se a escultura, a pintura e todas as formas de representação de ideias. Em ciência, a utilização de modelos é uma atividade corriqueira, desde os modelos em escala reduzida (barragens, topografia, edificações etc.) até modelos de aviões para estudo de aerodinâmica e modelos analíticos de processos físicos e mentais (MARTINS, 2022, p.434).

Essas amostragens são realizadas através das distribuições de probabilidade conhecidas e que caracterizam os processos referentes aos fenômenos físicos investigados. Como resultado, obtêm-se valores médios que estão relacionados com grandezas físicas integrais de interesse.

### 3.3 Modelagem matemática para aplicações envolvendo integrais

O método de Monte Carlo, basicamente, estrutura-se a partir de um modelo que envolve a geração de observações de alguma distribuição de probabilidades e o uso da amostra obtida para aproximar a função de interesse. Uma das primeiras aplicações do método foi para calcular integrais. A ideia do método centra-se em escrever a integral que se deseja calcular como um valor esperado. Assim, seja  $g(x)$  uma função e suponha que se quer calcular  $\theta$ , onde (PAULA, 2014):

$$\theta = \int_0^1 g(x) dx. \quad (1)$$

Para tanto, considere  $U$  uma variável aleatória uniformemente distribuída no intervalo  $(0,1)$  então:

$$\theta = \int_0^1 g(x) dx = E[g(U)]. \quad (2)$$

Definindo  $U_1, \dots, U_k$  como variáveis aleatórias uniformes independentes, tem-se que as variáveis aleatórias  $g(U_1), g(U_2), \dots, g(U_k)$  são independentes e identicamente distribuídas tendo média  $\theta$ . Portanto, pela lei forte dos grandes números, segue que:

$$\sum_{i=1}^k \frac{g(U_i)}{n} \rightarrow E[g(U)] = \theta, \quad (3)$$

onde:  $n \rightarrow \infty$ .

Assim, pode-se aproximar  $\theta$  gerando uma grande quantidade de números aleatórios  $U_i$  e tomar como aproximação o valor médio de  $g(U_i)$ .

Para calcular  $\int_a^b g(x) dx$ , basta realizar uma substituição  $y = \frac{x-a}{b-a}$ ,  $dy = \frac{dx}{(b-a)}$ :

$$\theta = \int_0^1 g(a + [b - a]y)(b - a)dy = \int_0^1 h(y)dy, \quad (4)$$

onde:

$$h(y) = (b - a)g(a + [b - a]y). \quad (5)$$

O que permite aproximar  $\theta$  gerando continuamente números aleatórios e tomando o valor médio de  $h$  calculado a partir destes números.

Se o foco está em calcular  $\int_0^\infty g(x) dx$ , pode-se aplicar a substituição  $y = \frac{1}{(x+1)}$ ,  $dy = \frac{-dx}{(x+1)^2} = -y^2 dx$ , para obter a identidade:

$$= \int_0^1 h(y)dy, \theta \quad (6)$$

onde:

$$h(y) = \frac{g\left(\frac{1}{y} - 1\right)}{y^2}. \quad (7)$$

O método também pode ser utilizado para o caso de integrais multidimensionais, considerando que  $g$  é uma função com argumento  $n$ -dimensional e se quer calcular:

$$\theta = \int_0^1 \int_0^1 \dots \int_0^1 g(x_1, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n. \quad (8)$$

Tem-se que  $\theta$  pode ser expresso como  $\theta = E[g(U_1, \dots, U_n)]$ , onde  $U_1, \dots, U_n$  são variáveis aleatórias uniformes (0,1) independentes. Portanto, para calcular  $\theta$  compreende-se necessário gerar  $k$  conjuntos independentes, cada um consistindo de  $n$  variáveis uniformes (0,1) independentes:

$$\begin{array}{l} U_1^1, \dots, U_n^1 \\ U_1^2, \dots, U_n^2 \\ \vdots \\ U_1^k, \dots, U_n^k. \end{array} \quad (9)$$

Desse modo, as variáveis  $g(U_1^i, \dots, U_n^i), i = 1$  são todas independentes e identicamente distribuídas com média  $\mu$ , permitindo estimar:

$$\theta \text{ por } \sum_{i=1}^k g(U_1^i, \dots, U_n^i)/k. \quad (10)$$

Usando números aleatórios mostra-se possível também gerar os valores de variáveis aleatórias de distribuições arbitrárias.

Já Luna (2022) cita o uso da aproximação de Monte Carlo, considerando a facilidade de simular uma amostra de tamanho  $n$ , denotada por  $X_1, \dots, X_n$ , da v.a.  $X$  com densidade  $f(x)$ . Então, para uma função real  $h$ , a média amostral de  $h(X)$  pode ser (11) e que pela lei dos grandes números ela converge para  $E[h(X)]$ , mostrando que quando  $h(X)$  tem uma variância finita, pelo teorema do limite central, o erro desta aproximação pode ser caracterizado por:

$$\bar{h}_n := \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h(X_i). \quad (11)$$

$$\frac{\bar{h}_n - \mathbb{E}_f[h(X)]}{\sqrt{n \text{Var}(h(X))}} \sim N(0,1). \quad (12)$$

Já o termo de variância  $\text{Var}(h(X))$  pode ser aproximado pela variância da amostra:

$$\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (h(X_i) - \bar{h}_n)^2. \quad (13)$$

Considerando a aplicação no estudo de redes neurais, Barbosa, Freitas e Neves (2005) explicam que a utilização do método Monte Carlo requer a geração de  $N$  amostras independentes das variáveis aleatórias obtidas a partir da função de probabilidade conjunta  $f_{\mathbf{X}}(\mathbf{X})$ , onde a falha pode ser expressa utilizando o método Monte Carlo, partindo a integral definida por:

$$P_f = \int_{G_{\mathbf{X}}(\mathbf{X}) \leq 0} \int \dots \int f_{\mathbf{X}}(\mathbf{X}) d\mathbf{X}, \quad (14)$$

ou:

$$P_f = \int_{\forall \mathbf{X}} \int \dots \int I[G_{\mathbf{X}}(\mathbf{X}) \leq 0] f_{\mathbf{X}}(\mathbf{X}) d\mathbf{X}. \quad (15)$$

Em que  $G_{\mathbf{X}}(\mathbf{X})$  representa a função “falha”, onde relaciona as variáveis envolvidas na análise com a equação (14). Considera-se ainda um indicador que corresponde aos valores apresentados em (16) e reescrito (17):

$$I[\cdot] = \begin{cases} 1 & \text{se } G_{\mathbf{X}}(\mathbf{X}) > 0 \\ 0 & \text{se } G_{\mathbf{X}}(\mathbf{X}) \leq 0 \end{cases} \quad (16)$$

e

$$P_f = \sum_{i=1}^N I[G_X(\mathbf{X}^i) \leq 0] \cdot \frac{1}{N}, \quad (17)$$

onde  $\mathbf{X}^i$  representa a i-ésima amostra do vetor das variáveis geradas a partir da função da probabilidade  $f_X(\mathbf{X})$ , permitindo que o valor das probabilidades seja expresso por:

$$P_f = \frac{\text{N}^\circ \text{ de Simulações em que } G_X(\mathbf{X}) \leq 0}{N} \quad (18)$$

Apresenta-se a variância, para os valores pequenos referentes à probabilidade de falhas em:

$$\text{Var}(P_f) = P_f \cdot \frac{(1 - P_f)}{N} \cong \frac{P_f}{N}, \quad (19)$$

onde para esse caso, redes neurais em estruturas usuais, a probabilidade de falha mostra-se pequena, sendo normalmente da ordem de  $10^{-3}$  a  $10^{-5}$ . Assim, como sua variância é expressa de forma inversamente proporcional ao número total de simulações, o valor de  $N$  tende a ser elevado para que se possa aceitar as aproximações de  $P_f$ , justificando assim o uso do método Monte Carlo como técnica.

De acordo com Oliveira, Paiva e Paiva (2019), o método Monte Carlo pode ser utilizado em diversas áreas, incluindo a melhoria dos processos de atendimento em oficinas de manutenção, a otimização do desempenho, o apoio a decisões gerenciais, a definição do melhor mix de produtos e serviços, a ajuda na decisão de investimentos, e em conjunto com outras metodologias para atender particularidades de certos problemas.

Por exemplo, pode ser associado às Cadeias de Markov para estudar a determinação do ciclo de vida e confiabilidade, ou para quantificar incertezas em conjunto com a Lógica Fuzzy.

### **3.4 Considerações finais**

Neste capítulo foi realizada uma apresentação geral do Método Monte Carlo. Contemplou desde a definição do método, com a abordagem sobre a origem e utilização; a descrição metodológica, destacando sua aplicabilidade e etapas de implementação até a modelagem matemática para aplicações envolvendo integrais.

## **4 METODOLOGIA PROPOSTA**

Nesse capítulo foram apresentadas as características técnicas do problema sob investigação, manutenção em postes de sirenes de barragens de mineração. Foram descritas as técnicas adotadas para a coleta dos dados, assim como descrita a metodologia proposta para a aplicação do Método de Monte Carlo ao problema sob estudo.

### **4.1 Contextualização**

Este trabalho apresenta uma investigação quantitativa e qualitativa com foco em descrever, interpretar e compreender a percepção da gestão da segurança em barragens de contenção de rejeitos de mineração. Para tanto, foi realizado um levantamento bibliográfico, buscando atender uma demanda de informações sobre a gestão da manutenção de barragens no ramo industrial minerador a partir do cenário nacional. O levantamento bibliográfico fundamentou-se principalmente na comparação dos critérios de classificação de barragens no Brasil e nas perspectivas de manutenção considerando as legislações e medidas adotadas para promoção da segurança em barragens. Esta pesquisa também buscou dados de barragens de contenção de rejeitos de uma empresa de mineração atuante no estado de Minas Gerais como fonte real para a aplicação do Método Monte Carlo.

### **4.2 Delimitação da pesquisa**

O estudo realizado neste trabalho concentrou-se na análise da manutenção e controle das sirenes de emergência das barragens monitoradas de uma região específica, delimitada entre os municípios de Belo Horizonte e seus limítrofes até Congonhas, de uma empresa de mineração atuante em Minas Gerais, conforme dados históricos compreendidos no período de agosto de 2020 a dezembro de 2022, com foco nas falhas apresentadas por 73 postes de sirenes de barragens de rejeitos.

### **4.3 Plano de análise dos dados**

Na empresa de mineração, cujas barragens de rejeitos são objeto de investi-

gação deste trabalho, as falhas apresentadas por 73 postes sirenes, monitoradas em tempo real, são armazenadas, tratadas e compiladas a partir das informações disponíveis em painéis de monitoramento desenvolvidos utilizando a ferramenta Microsoft Power BI. Esses painéis geram informações internas sobre o controle destas sirenes.

A análise dos dados coletados foi realizada conforme apresentado na Figura 07. Inicialmente foi criado um banco de dados contendo as informações de falha dos postes de sirenes sob investigação, tornando-se esse o universo de dados desta pesquisa.

Figura 07- Diagrama de blocos da análise dos dados



Fonte: Autor (2023)

A partir destas informações, foi estabelecida uma estratificação e classificação de todos os eventos ocorridos (capacidade sonora reduzida, erro crítico, erro não crítico e erro de comunicação). Esses dados foram organizados em uma planilha do software Microsoft Office Excel, conforme apresentado no ANEXO A. Essa organização dos dados teve o objetivo de verificar o padrão de distribuição dos dados por meio de cálculos estatísticos e identificar se eles eram passíveis de aplicação do método de Monte Carlo.

Posteriormente foi aplicado o método de Monte Carlo, com a utilização de números aleatórios, para simular cenários de previsibilidade de falhas futuras, podendo a análise ser estendida através de janela expansível, permitindo planejar a manutenção de forma adequada e segura.

#### 4.4 Pesquisa experimental: monitoramento de barragens

A manutenção das barragens de rejeitos tem como ponto de partida o monitoramento diário, realizado por coleta de dados de sensores em tempo real, e o estudo técnico de variáveis que caracterizam o comportamento de suas estruturas.

Além desse tipo de monitoramento, também são realizadas inspeções físicas periódicas e coletas de informações obtidas de manutenções preventivas e sistemáticas executadas por equipe multidisciplinar especializada. Esses procedimentos fazem parte das atividades regulares da mineradora, com frequência variável segundo determinações legais. Essas ações têm por objetivo identificar anomalias nas barragens que possam afetar a sua segurança e/ou estabilidade, tais como trincas, umidades, focos de insetos e/ou pragas como cupins, formigueiros, entre outros etc.

Tomando como base a empresa para a qual a metodologia proposta neste trabalho é aplicada, o monitoramento é composto pela leitura de dados de instrumentação convencional (piezômetros, medidores de nível de água, medidores de vazão, medidores de recalque, pluviômetros, barômetros, entre outros), radares, estações robóticas, sismógrafos, videomonitoramento e sensores responsáveis por detectar colapso ou possível colapso das estruturas.

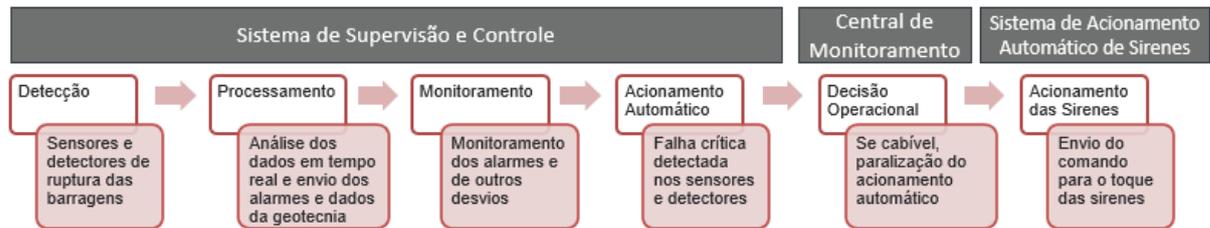
Para fins de monitoramento e tomada de decisão, as informações sobre as condições deste conjunto de componentes são processadas e transmitidas ao Sistema de Supervisão e Controle (SSC) e ao sistema de Acionamento Automático de Sirenes (AAS). Neste trabalho, é esse mesmo conjunto de dados que é investigado por meio do método de Monte Carlo.

#### **4.4.1 Sistema de Supervisão e Controle (SSC) e Sistema de Acionamento Automático das Sirenes (AAS)**

O Sistema de Supervisão e Controle de Sirenes (SSC) funciona a partir de sensores que realizam a detecção das condições das barragens, procurando falhas. As informações coletadas na detecção são enviadas por sinal de rádio e passam ao processamento, onde é realizada uma análise em tempo real conforme os preceitos considerados ideais pela geotecnia.

A partir deste momento o acionamento dos alarmes pode ser realizado de forma automática, se necessário, no caso de ocorrência de uma falha crítica detectada pelos sensores. As etapas de atuação do SSC e do AAS são ilustradas no diagrama da Figura 08.

Figura 08- Estratégia do Sistema de Acionamento Automático de Sirenes



Fonte: Autor (2023)

Após a análise do SSC, a Central de Monitoramento atuante em tempo integral, realiza a decisão operacional de permitir ou cancelar o acionamento automático das sirenes. Assim, a atuação do AAS é realizada posteriormente a análise e monitoramento dos dados. Essa etapa consiste em acionar o conjunto de sirenes de forma automática ou de forma manual, através de um software, por meio do comando do analista responsável.

Esse acionamento tem o objetivo de alertar as comunidades próximas as barragens de rejeitos em situações de emergência, decorrentes de eventos adversos que afetem a segurança da barragem e possam causar danos à sua integridade estrutural e operacional, à preservação da vida, da saúde, da propriedade e do meio ambiente.

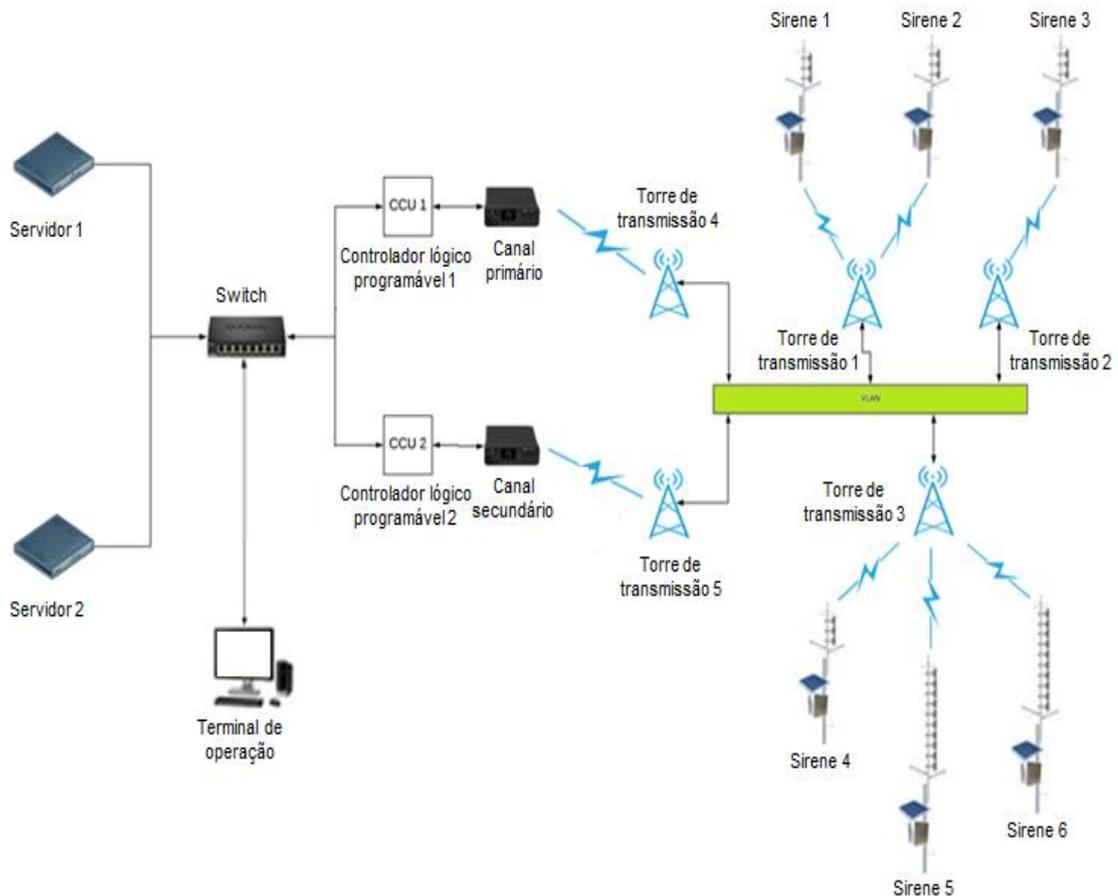
O AAS é iniciado automaticamente quando a decisão operacional é por enviar comando para toque das sirenes, nos momentos de falha crítica ou nos momentos de teste dos sistemas de supervisão e controle.

Salienta-se que as sirenes de emergência, que são projetadas para cobrir todas as áreas onde existem pessoas em torno da mancha de inundação, são fundamentais para alertar a comunidade numa eventual ocorrência de rompimento de barragem, portanto precisam estar em condições operacionais que garantam sua completa funcionalidade. Ou seja, no contexto deste trabalho, as sirenes devem ser objeto de um procedimento apropriado de manutenção.

Conforme ilustra a topologia de rede representada na Figura 09, cada sirene possui dois canais de comunicação que funcionam como redundância a fim de evitar a indisponibilidade da sirene de tocar quando necessário. O envio de informações é realizado através de uma rede de transmissão VHF para os controladores lógicos programáveis, onde estão contidas as lógicas do processo e a partir da qual os dados

são transmitidos aos servidores que contém o software dedicado de acionamento das sirenes.

Figura 09- Topologia de rede do sistema de acionamento automático de sirenes



Fonte: Autor (2023)

A atividade de monitoramento barragens é realizada em um ambiente físico projetado, estruturado e dedicado exclusivamente a essa função com equipe técnica trabalhando durante 24 horas por dia nos 7 dias da semana.

Nas indústrias mineradoras, existe a regulamentação que todas as barragens de rejeitos devem contar com AAS que podem diferenciar em termos de topologia aplicada, porém se assemelham em funcionalidade.

O AAS possui uma rotina de testes que são realizados periodicamente para garantir sua correta funcionalidade. Esses testes são realizados de forma automatizada ou manual conforme agendamento ou demanda, podendo ser diários, semanais ou mensais conforme detalhamento no Quadro 05:

Quadro 05- Detalhamento dos testes do sistema de acionamento de sirenes

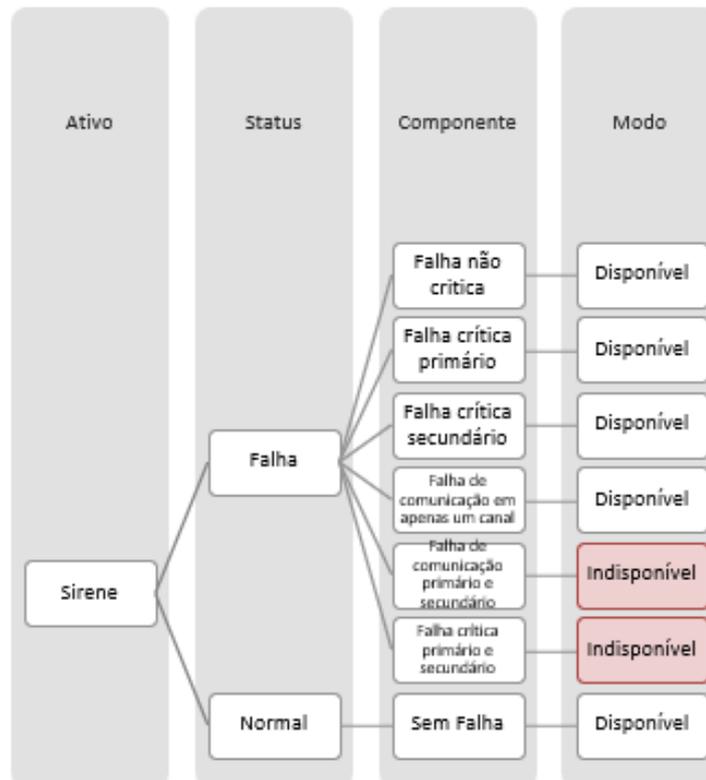
Testes	Detalhamento
Comando status	Diagnóstico das sirenes por meio do comando "Status", que é utilizado para validar alguns eventos gerados no hardware. Por meio desse comando é possível visualizar informações pontuais de status como a quantidade de cornetas que não estão funcionando, se a porta do gabinete está aberta, violação do perímetro, temperatura interna de operação
Teste RTC	O teste RTC é feito para sincronizar a hora de todos os ativos do servidor primário e todos os ativos do servidor secundário. Dessa forma é possível garantir que, caso haja necessidade de alternância entre servidores, as informações estejam sincronizadas.
Testes silenciosos	O comando "Teste Silencioso" é utilizado para validar se o todo hardware da sirene está operando corretamente. O principal objetivo deste teste é verificar se existem cornetas (Drive) ou amplificadores danificados (LF inválidos) e eles são realizados aos finais de semana.
Testes sonoros	O teste sonoro é realizado mensalmente pelo centro de monitoramento, e acompanhado por todas as áreas envolvidas, que gera um relatório de evidências (positivo ou negativo).

Fonte: Autor (2023) adaptado do Manual do Sistema de Acionamento Automático de Sirene

Os eventos gerados pelo sistema são validados pelo responsável do software e encaminhados ao centro de monitoramento para iniciar as tratativas de manutenção necessárias conforme a criticidade de cada evento. Após cada teste mostra-se possível verificar se a sirene apresentou algum tipo de erro.

As falhas que as sirenes podem apresentar, impactando na condição de manutenção e monitoramento das barragens são classificadas e organizadas de acordo com a árvore apresentada na Figura 10.

Figura 10- Árvore de falhas de sirenes



Fonte: Autor (2023)

Essas falhas podem ser do tipo: falha não crítica, falha crítica e falha de comunicação, conforme apresentado no Quadro 06. Essas falhas são avaliadas a fim de detectar o tipo de erro para que a equipe de manutenção possa atuar de forma assertiva à demanda.

Quadro 06- Falhas que as sirenes podem apresentar

TIPO DE FALHA	DESCRIÇÃO
<b>Falha não crítica</b>	Erro nos componentes da sirene identificados pelo software que não impossibilita o funcionamento da sirene, em um ou ambos os canais.
<b>Falha crítica</b>	Ocorre quando a sirene se encontra sem os recursos mínimos necessários para operação, ou seja, componentes, em um ou ambos os canais de forma persistente.
<b>Falha de comunicação</b>	Ocorre quando o software envia sinal pelo canal primário ou secundário da sirene e não obtém resposta, em um ou ambos os canais.

Fonte: Autor (2023) adaptado do Manual do Sistema de Acionamento Automático de Sirene

Neste trabalho o conjunto de informações de falhas identificadas nos testes de monitoramento em tempo real, foram organizados conforme apresentado nos ANEXOS A e B e foram a base para a aplicação do Método Monte Carlo.

#### 4.5 Estatística de dados das falhas de sirenes de barragens

Nesta seção é apresentada a descrição dos estudos estatísticos realizados no conjunto de dados sob análise para verificação da viabilidade de aplicação do Método de Monte Carlo. As fórmulas utilizadas como base de cálculo foram fundamentadas em Filho (2001), Castanheira (2012) e SETEC (2023).

##### 4.5.1 – Análises estatísticas de falhas totais

Neste trabalho foram consideradas informações sobre falhas em sirenes durante 29 meses ( $n = 29$ , de agosto de 2020 a dezembro de 2022), conforme ANEXO A. Inicialmente foram calculadas as medidas descritivas para caracterizar a condição atual do total de falhas. O primeiro cálculo é a média, que é onde se localiza o centro da distribuição dos dados. A média aritmética, como exposto por Carvalho (2008) e Castanheira (2012), insere-se nas medidas de posição ou de tendência central, aqui adotada como média aritmética simples, e corresponde a soma dos resultados obtidos pela divisão pela quantidade de resultados:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n TF_i}{n} = 773,55, \quad (20)$$

onde:

$\bar{x}$  – Média aritmética;

$n$  – Número de meses sob análise;

$TF$  – Total de falhas por mês.

Foi também calculada a reta de tendência utilizando o método dos mínimos quadrados (FILHO, 2001), representado pelas equações (21) a (23). Esta reta é apresentada na Figura 11.

$$u(x) = b_0 + b_1x \text{ ou } Y(\text{reta}) = Ax + b, \quad (21)$$

onde:

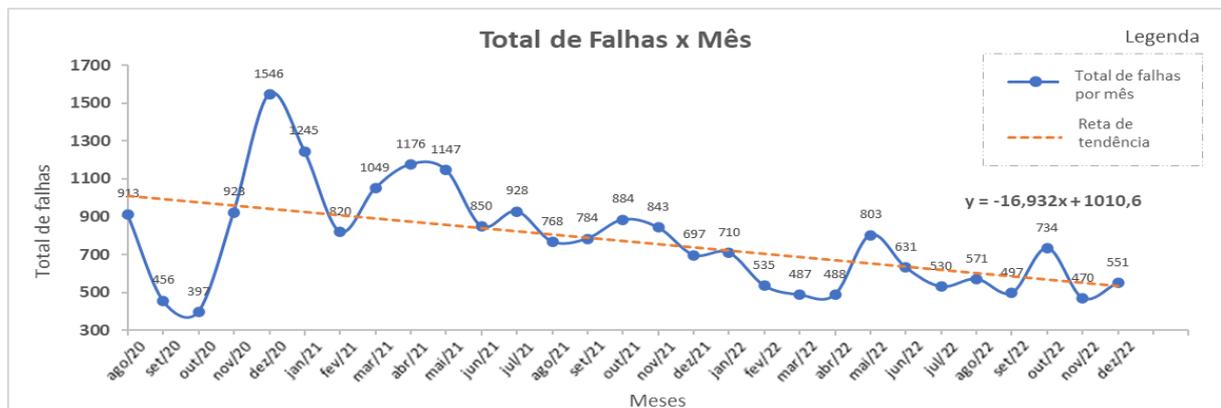
$$b_1 = \frac{\sum x_i \sum y_i - n \sum x_i y_i}{(\sum x_i)^2 - n \sum x_i^2} \quad (22)$$

e

$$b_0 = \frac{\sum y_i - b_1 \sum x_i}{n}. \quad (23)$$

Em que  $x$  corresponde ao número do mês (varia de 0 a 28) e  $y$  (reta) representa o número de falhas na reta de tendência, ilustrado na Figura 11:

Figura 11- Gráfico sequencial do total de falhas por mês



Fonte: Autor (2023)

A partir da reta de tendência, foram calculados os desvios entre o quantitativo de falhas de cada mês e a reta, sendo essa diferença denominada  $\Delta$  e os resultados obtidos apresentados no anexo A:

$$\Delta = |y_{real} - y_{(reta)}|, \quad (24)$$

onde:

$\Delta$  – Variação absoluta do total de falhas em relação a linha de tendência (em cada ponto, ou seja, por mês);

$y_{real}$  – Total de falhas em cada mês;

$y_{(reta)}$  – Linha de tendência, ou seja, equação da reta em cada mês.

E por fim, foi calculado o desvio padrão ( $\sigma$ ), que é a medida da variabilidade dos dados em torno da média. O desvio padrão, faz parte das medidas de dispersão, que conforme Carvalho (2008) apresenta-se como medida de dispersão absoluta. É aplicada se o conjunto analisado for uma população. Para Castanheira (2012) referem-se a medidas estatísticas utilizadas para verificar o quanto os valores encontrados em uma série de dados estão dispersos ou afastados em relação à média ou em relação à mediana. Tem sido a medida de dispersão mais utilizada na prática:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (TF_i - \bar{x})^2}{n}} = 273,95 \quad (25)$$

E o desvio padrão populacional de  $\Delta$ , ( $\sigma_{\Delta}$ ) que se apresenta como um detalhamento específico do desvio padrão geral adotado:

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}{n}} = 164,75. \quad (26)$$

Por conseguinte, é necessário determinar os quartis, que representam os valores que dividem o conjunto ordenado de dados em quatro partes iguais, de modo que cada parte represente  $\frac{1}{4}$  da amostra.

O primeiro quartil (Q1) é o valor até o qual se encontra 25% das amostras ordenadas  $(n+1)/4$ ; a mediana ou segundo quartil (Q2) é o valor até no qual se

encontra 50% das amostras ordenadas  $(n+1)/2$  e o terceiro quartil (Q3) é o valor até o qual se encontra 75% das amostras ordenadas  $(3(n+1))/4$ . A partir destes resultados, apresentadas na Tabela 01, foi gerado o gráfico *boxplot* (Figura 12) que representa simultaneamente as características de locação, dispersão, forma e presença de observações discrepantes (“*outliers*”) dos dados (ANEXO C).

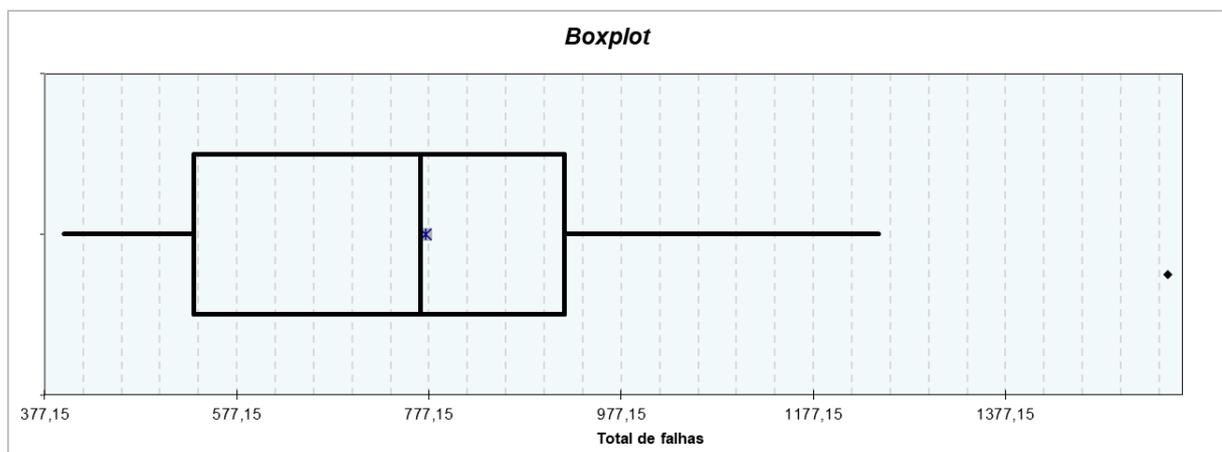
Tabela 01– Bases para o gráfico Boxplot

BOXPLOT – TOTAL DE PROBLEMAS	
$n$	29,00
Mínimo	397,00
1º Quartil	532,50
Mediana	768,00
3º Quartil	918,00
Máximo	1546,00
Limite Inferior (LI)	-45,75
Limite Superior (LS)	1496,25
Menor valor dentro (LI)	397,00
Maior valor dentro (LS)	1245,00
Média	773,55

Fonte: Autor (2023)

O ANEXO C apresenta as falhas em ordem crescente e marca as linhas dos quartis de cores diferentes.

Figura 12- Gráfico *boxplot* do total de falhas por mês.



Fonte: Autor (2023)

A análise do gráfico de *boxplot* permite observar um ponto *outlier*<sup>1</sup>, referente ao valor máximo de 1546 e que a média de falhas (773,55) está próxima da mediana (768), indicando uma boa medida de locação dos dados. Adicionalmente, 25% dos meses possuem a quantidade de falhas menor ou igual a 532,50, 50% dos meses possuem a quantidade de falhas menor ou igual a 768 e 75% dos meses possuem a quantidade de falhas menor ou igual a 918.

Por fim, foi realizado um teste de normalidade (ilustrado na Figura 13), que tem o objetivo de avaliar se os dados sob investigação seguem uma distribuição normal (curva de Gauss), o que implica que o valor de máxima frequência (moda), coincide com o valor da média e da mediana. Essa característica é requisito indispensável para que um método estocástico seja aplicado com sucesso.

O teste utilizado foi o de Ryan-Joiner, estatística que avalia a existência de correlação; se ela recair abaixo do valor crítico adequado, deve-se rejeitar a hipótese nula de normalidade da população.

Para aplicação do teste foi adotado como coeficiente de correlação é calculado como (SETEC, 2023):

$$R_p = \frac{\sum(Y_i - \bar{Y})b_i}{\sqrt{s^2(n-1)\sum b_i^2}} \quad (27)$$

onde:

$Y_i$  – Observações ordenadas;

$b_i$  – Contagens normais de seus dados ordenados;

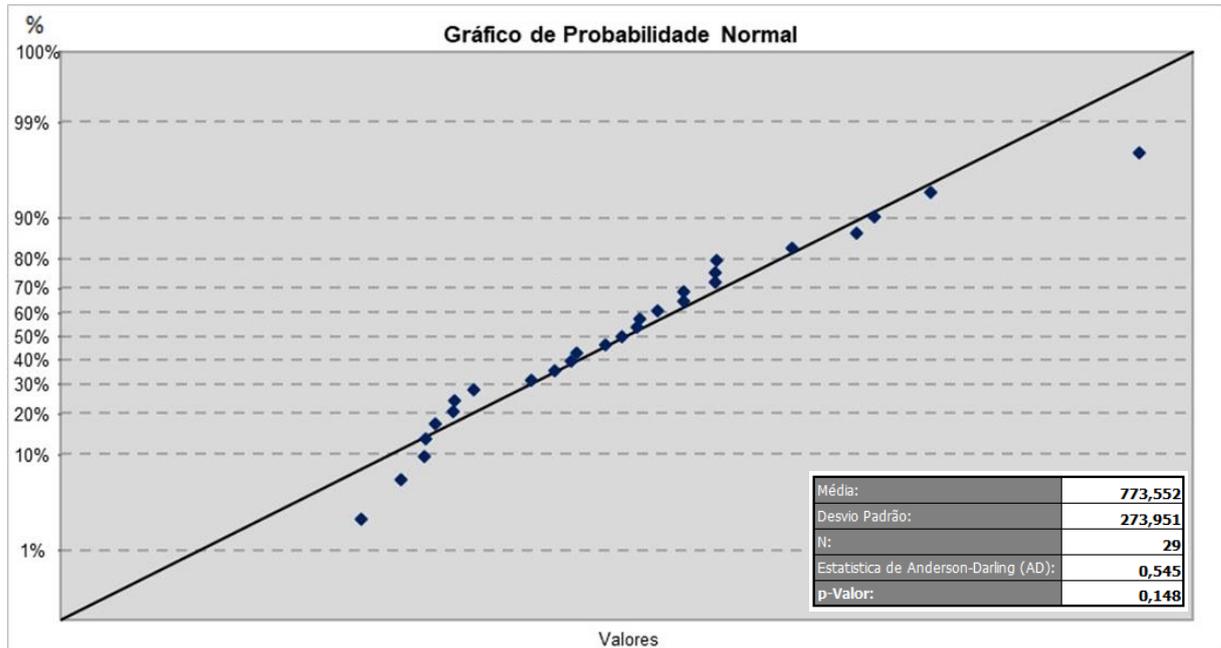
$s^2$  – Variância da amostra.

Nessa análise, busca-se testar se os dados sob estudo provêm ou não de uma distribuição normal. Se o modelo for adequado, o gráfico construído com os dados amostrais deve mostrar uma linha reta. Ou seja, o teste calcula a correlação entre os dados (pontos) e os *scores* normais (reta), que permitiram apresentar o gráfico de probabilidade normal do total de falhas por mês (Figura 13) a seguir:

---

<sup>1</sup> *Outlier* – ponto fora da curva

Figura 13- Gráfico de probabilidade normal do total de falhas por mês



Fonte: Autor (2023)

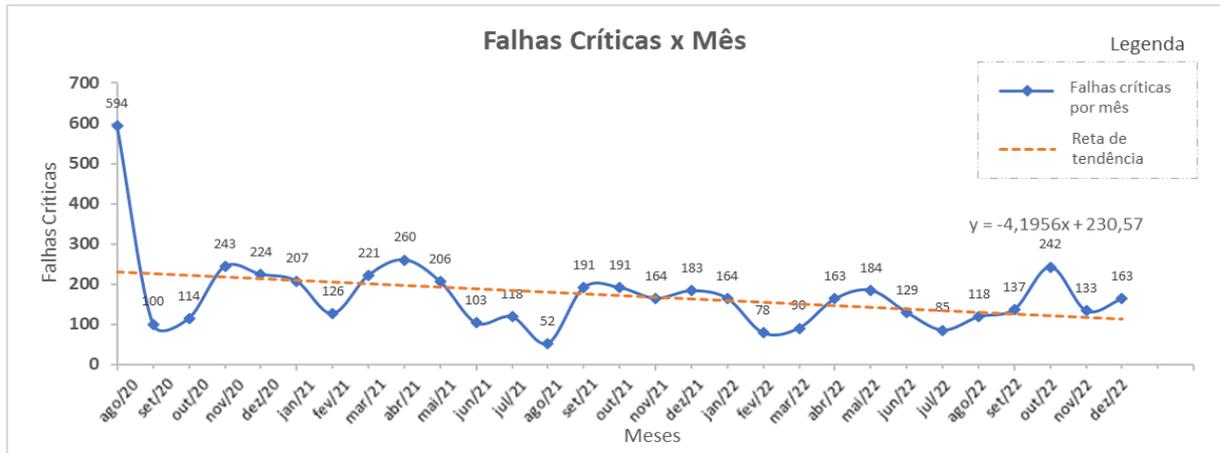
O teste de Ryan-Joiner fornece um coeficiente de correlação, o que indica a correlação entre os dados e as contagens normais de seus dados. A regra de decisão para esse teste define que: se p-Valor > 0,10, os dados seguem uma distribuição normal; se p-Valor entre 0,05 e 0,10, avaliar simetria pelo histograma e se p-Valor < 0,05 os dados não seguem uma distribuição normal (SETEC, 2023). Como o p-Valor encontrado foi igual a 0,148, os dados seguem uma distribuição normal e, portanto, são apropriados para análise utilizando um método estatístico.

#### 4.5.2 Análises estatísticas somente sob a perspectiva de falhas críticas

Tomando como base o quadro de falhas apresentado no Quadro 06, também foram realizadas análises estatísticas e simulações somente sob a perspectiva de falhas críticas que impactam na operacionalidade das sirenes, conforme ANEXO B. Dessa forma, a avaliação desse conjunto de dados, trata somente a condição de indisponibilidade dos ativos.

Nesse caso, o histórico no período de ago/20 a dez/22 do quantitativo de falhas críticas identificadas tiveram os valores mínimo e máximo de 52 e 594, respectivamente, conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 14- Gráfico sequencial de falhas críticas por mês



Fonte: Autor (2023)

Na Figura 14, observa-se um ponto “outlier”, o valor de 594 falhas críticas em ago/20 e este foi expurgado das análises posteriores, pois apresenta um valor muito discrepante dos demais meses da base histórica. Então, o desvio padrão populacional de  $\Delta$  para falhas críticas (exceto o mês de ago/20) é de (28):

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{x})^2}{n}} = 27,85, \quad (28)$$

onde:

$\Delta_i$  – Variação absoluta do total de falhas em relação a linha de tendência (em cada ponto, ou seja, por mês), variando do primeiro dado até o vigésimo nono;

$\bar{x}$  – Média aritmética;

$n$  – Número de meses sob análise.

Aplicando as equações de (20) a (26), tem-se os resultados apresentados na Tabela 02 e onde também é apresentada uma comparação das análises estatísticas considerando as falhas totais:

Tabela 02– Resultado dos cálculos estatísticos

<b>Cálculos Estatísticos</b>	<b>Falhas Totais</b>	<b>Falhas Críticas</b>	<b>Falhas Críticas (sem outlier)</b>
Média	773,55	171,82	156,75
Desvio padrão	273,95	97,82	55,55
Desvio padrão populacional	164,75	69,98	27,85

Fonte: Autor (2023)

Para as falhas críticas, não foram realizadas as análises estatísticas específicas do boxplot e gráfico de probabilidade normal, por entender que essas falhas estão contidas no quantitativo de falhas totais e a verificação da distribuição de dados contemplou também as falhas críticas. Os resultados obtidos para os cálculos de média, desvio padrão e desvio padrão populacional considerados para aplicação do método de Monte Carlo adotados sob a perspectiva de falhas críticas são os que desconsideram o ponto outlier, uma vez que este foi discrepante dos demais meses da base histórica e com a inclusão deste dado não retrataria a realidade nos cálculos estatísticos.

#### **4.6 Aplicação do método de Monte Carlo para o caso de manutenção das barragens**

Nesta seção o Método de Monte Carlo é aplicado na previsão de falhas em postes de sirenes em barragens de rejeito de mineração.

##### **4.6.1 Previsão do cenário futuro de falhas totais dos postes de sirenes de barragens de rejeitos através do método estocástico de Monte Carlo**

A partir dos dados estatísticos apurados, foi utilizado o método estocástico de Monte Carlo, para previsão de falhas futuras totais do conjunto de sirenes de barragens de rejeitos investigados. A ferramenta selecionada para realizar a simulação foi o Microsoft Excel, pelo fato de simples manuseio e democratização da informação.

Para essa simulação, os valores da reta de tendência são estimados a partir do último dado real (janela expansiva de 29 meses) do total de falhas, com a correção

dos valores para 95% de probabilidade, ou seja, dados de desvio padrão no intervalo compreendido entre  $[-2\sigma, +2\sigma]$ . Essa escolha posiciona a tendência mais próxima possível dos dados reais. Conforme Castanheira (2012) a distribuição normal mostra-se simétrica em relação à média e, mesocúrtica e assíntota em relação ao eixo das abscissas, em ambas as direções, frequentemente descrita como tendo a forma de um sino, também conhecida como Curva de Gauss. A distribuição de probabilidade normal mostra-se importante na inferência estatística por três razões distintas, sendo a primeira, que as medidas produzidas em diversos processos aleatórios seguem essa distribuição; a segunda, as probabilidades normais podem ser frequentemente usadas como aproximações de outras distribuições probabilísticas, e; a terceira, as distribuições estatísticas da amostra, tais como a média e a proporção frequentemente seguem a distribuição normal independente da distribuição da população. Além disso, a adoção de valores padronizados para a distribuição normal torna desnecessário o uso de equação de densidade de qualquer distribuição dada.

Logo, a geração de dados aleatórios reais, para o intervalo  $[a,b]$  foi realizada da seguinte forma:

$$d = a + (b - a) \times \text{aleatório}(). \quad (29)$$

Assim, a previsão de falhas é calculada da seguinte forma:

$$y = ax + b + 2 \times \sigma \times [-1 + 2 \times d], \quad (30)$$

onde:

$d$  – Conjunto de dados aleatórios;

$a$  – Número real do início do intervalo, ou seja,  $-2\sigma$ ;

$b$  – Número real do final do intervalo, ou seja,  $+2\sigma$ ;

$\sigma$  – Desvio padrão no intervalo compreendido entre  $[-2\sigma, +2\sigma]$ ;

$\text{aleatório}()$  – Geração de número aleatório maior ou igual a zero (0) e menor que um (1) do Excel.

$y$  – Reta de tendência após a geração dos números aleatórios.

Dessa forma, os números aleatórios gerados em cada simulação vão oscilar em torno do número de falhas real considerando o intervalo de confiança de 95% da curva Gaussiana.

Com os últimos dados encontrados em 50 e 100 simulações (ANEXO A), são calculadas a média e o desvio padrão e obtém-se o cenário otimista e pessimista (33), (34), (37) e (38). (Obs: considerando o quantitativo de falhas, quanto menor melhor).

Para 50 simulações obteve-se:

$$\bar{x} = 547,36, \quad (31)$$

$$\sigma = 199,13. \quad (32)$$

Cenário otimista:

$$\bar{x} - \frac{2\sigma}{\sqrt{n}} = 491 \text{ falhas totais}. \quad (33)$$

Cenário pessimista:

$$\bar{x} + \frac{2\sigma}{\sqrt{n}} = 604 \text{ falhas totais}. \quad (34)$$

Para 100 simulações:

$$\bar{x} = 553,94, \quad (35)$$

$$\sigma = 191,45. \quad (36)$$

Cenário otimista:

$$\bar{x} - \frac{2\sigma}{\sqrt{n}} = 515 \text{ falhas totais}. \quad (37)$$

Cenário pessimista:

$$\bar{x} + \frac{2\sigma}{\sqrt{n}} = 592 \text{ falhas totais}. \quad (38)$$

Onde:

$\bar{x}$  – Média aritmética;

$n$  – Número de meses sob análise;

$\sigma$  – Desvio padrão no intervalo compreendido entre  $[-2\sigma, +2\sigma]$ .

#### 4.6.2 Previsão do cenário futuro somente sob a perspectiva de falhas críticas dos postes de sirenes de barragens de rejeitos através do método estocástico de Monte Carlo

Considerando os dados de falhas críticas, conforme ANEXO B, os seguintes resultados foram obtidos aplicando o mesmo processo apresentado na seção 4.6.1:

Para 50 simulações:

$$\bar{x} = 141,35, \quad (39)$$

$$\sigma = 31,36. \quad (40)$$

Cenário otimista:

$$\bar{x} - \frac{2\sigma}{\sqrt{n}} = 132 \text{ falhas críticas}. \quad (41)$$

Cenário pessimista:

$$\bar{x} + \frac{2\sigma}{\sqrt{n}} = 150 \text{ falhas críticas}. \quad (42)$$

Para 100 simulações:

$$\bar{x} = 139,87, \quad (43)$$

$$\sigma = 32,25. \quad (44)$$

Cenário otimista:

$$\bar{x} - \frac{2\sigma}{\sqrt{n}} = 133 \text{ falhas críticas}. \quad (45)$$

Cenário pessimista:

$$\bar{x} + \frac{2\sigma}{\sqrt{n}} = 146 \text{ falhas críticas}. \quad (46)$$

Pode-se perceber pela simulação de Monte Carlo que a previsibilidade de falhas totais para os cenários otimista e pessimista aproximada foi de 8 falhas totais. Já para cenário de falhas críticas, em que as sirenes deixam de desempenhar sua função, essa média passou a ser de 2 falhas mensais por sirene.

### 4.6.3 Validação

A etapa de validação tem o objetivo de analisar se a metodologia implementada para as previsões de falha, considerando os cenários pessimista e otimista, no mês seguinte foi fidedigna.

A verificação do mês de janeiro, para o conjunto de falhas totais foi realizada baseada no conjunto de dados ( $n = 29$ , de agosto de 2020 a dezembro de 2022) apresentados anteriormente e comprova que a previsão teve o comportamento esperado, dentro dos limites dos cenários simulados, uma vez que ocorreram 582 falhas totais.

A partir do mês de janeiro de 2023, foram calculados novamente os dados estatísticos para o conjunto de falhas totais, aplicando as equações de (20) a (26) e, posteriormente, realizadas as simulações através do método de Monte Carlo, conforme equações (29) e (30) e (35) a (38), incrementando o conjunto de dados de mais um mês ( $n = 30$ , de agosto de 2020 a janeiro de 2023) e verificando o total de falhas do mês de fevereiro que também atendeu os limites de cenários pessimista e otimista. A mesma analogia se repete para os meses subsequentes, ou seja, fevereiro, março e abril de 2023 e os resultados obtidos demonstraram que o total de falhas ocorridos em todos os meses investigados estão dentro dos limites de previsibilidade estimado, conforme os dados apresentados na Tabela 03 a seguir:

Tabela 03– Validação da metodologia para aplicação do método Monte Carlo ao conjunto de falhas totais dos postes de sirene em barragens de rejeitos de mineração

<b>Cálculos Estatísticos e Simulações para Falhas Totais</b>	<b>dez/22</b>	<b>jan/23</b>	<b>fev/23</b>	<b>mar/23</b>	<b>abr/23</b>
Média	773,55	767,17	756,39	747,16	740,94
Desvio padrão	273,95	271,45	273,55	274,12	272,16
Desvio padrão populacional	164,75	162,91	160,98	160,00	158,09
Cenário otimista (100 SIM)	515	429	451	462	384
Cenário pessimista (100 SIM)	592	533	547	563	489
Total de falhas ( <b>mês seguinte</b> )	582	433	461	542	388
<b>Validação</b>					

Fonte: Autor (2023)

A etapa de validação também foi realizada para o conjunto de falhas críticas, que seguiram o mesmo processo, entretanto os resultados encontrados, conforme

Tabela 04, apresentaram o comportamento de acordo com as previsões de falha acerca dos cenários pessimista e otimista somente em dois meses, foram eles fevereiro e março de 2023. Vale a pena ressaltar, que para os meses de janeiro, abril e maio de 2023, a estimativa foi consideravelmente superior ao cenário pessimista, em média 47% acima do valor previsto.

Tabela 04– Validação da metodologia para aplicação do método Monte Carlo ao conjunto de falhas críticas dos postes de sirene em barragens de rejeitos de mineração

<b>Cálculos Estatísticos e Simulações para Falhas Críticas</b>	<b>dez/22</b>	<b>jan/23</b>	<b>fev/23</b>	<b>mar/23</b>	<b>abr/23</b>
Média	156,75	159,17	157,90	156,71	158,13
Desvio padrão	55,55	56,09	55,55	55,02	54,71
Desvio padrão populacional	27,85	28,57	28,71	28,85	28,71
Cenário otimista (100 SIM)	133	120	118	120	129
Cenário pessimista (100 SIM)	146	138	135	135	142
Total de falhas ( <b>mês seguinte</b> )	227	121	121	202	194
<b>Validação</b>	<b>+</b>	<b>✓</b>	<b>✓</b>	<b>+</b>	<b>+</b>

Fonte: Autor (2023)

Em suma, para todos os meses em que o quantitativo de falhas ocorridas foi superior aos valores estimados nas simulações, ocorreram simulados práticos de emergência. O simulado prático de emergência de barragens é uma ação preventiva de extrema importância para treinar a população que ocupa a Zona de Autossalvamento (ZAS) a como agir em caso de uma emergência e reforçar a cultura de prevenção de riscos. As sirenes são acionadas e os moradores da Zona Autossalvamento (ZAS) ou em circulação pela área sinalizada com as placas de rota de fuga, seguem o direcionamento até chegar num local seguro, indicado pela placa Ponto de Encontro (PE).

Para comprovar a análise em questão, também é verificada a elevação de falhas críticas em meses que ocorreram simulados, observando-se os dados históricos analisados no período da pesquisa, compreendido entre agosto de 2020 a dezembro de 2022.

#### 4.7 Discussão dos resultados

A aplicação do método Monte Carlo mostrou-se eficaz como ferramenta analítica na questão da previsibilidade que alicerça a tomada de decisões como sugerem Yoriyaz (2009); Saraiva Jr, Tabosa e Costa (2011); Paula (2014); Vargas e Cruz-Carpio (2020) e outros, uma vez que seus recursos são úteis como apoio em problemas de engenharia em busca de estratégias.

Um ponto importante observado foi que a tendência de falhas tem diminuído com o passar do tempo, conforme observado na Figura 11, que sugere uma característica de melhor qualidade das manutenções preventivas, apontando para que essa modalidade de manutenção tem oferecido resultados esperados. Considerando o exposto por Vitonto e Regattieri (2021), o modelo atende às necessidades de planejamento e controle essenciais para a manutenção que busca alicerçar a tomada de decisão com base na redução das falhas ao cuidar de suas instalações físicas.

Além disso, conforme mostram Lima (2020); Vitonto e Regattieri (2021), Mishra *et al.* (2021); Farahani e Tohidi (2021) o planejamento e controle da manutenção influencia no alcance da competitividade e afeta potencialmente os custos, por isso precisa ser coerente com as políticas adotadas pela empresa. O Método Monte Carlo, tem custo potencialmente baixo, a partir das ferramentas já instaladas, permitindo um ganho considerável em termos potenciais de tomada de decisão sobre a manutenção, principalmente na modalidade preventiva.

Outro aspecto relevante verificado, para 50 e 100 simulações, respectivamente foi que quanto maior a repetição dos testes, mais o resultado converge para um valor com maior precisão, conforme Yoriyaz (2009) e Vargas e Cruz-Carpio (2020). Entretanto, os resultados obtidos de 50 para 100 simulações apresentou a variação máxima de 5%, tanto para o total de falhas quanto para falhas críticas, valor considerado insignificante do ponto de vista de quantidade de falhas, para justificar um aumento da quantidade de simulações realizadas.

Para o cenário de falhas críticas, em que as sirenes deixam de desempenhar sua função, essa média passou a ser de 2 falhas mensais por sirene. Nesse caso, em específico, todas as manutenções precisam ser tratadas como emergenciais e possuem um tempo determinado de manutenção de, no máximo, vinte e quatro (24) horas, demandando maior atenção dos gestores para garantia da operacionalidade e disponibilidade dessas sirenes.

Conforme exposto por Vitonto e Regattieri (2021), a manutenção emergencial não é a manutenção mais indicada, na maioria dos casos, principalmente porque dentre as formas de manutenção, esta costuma apresentar custos mais elevados. E reforça-se aqui, devido a criticidade que envolve as barragens, o risco de sinistro fatal, passível inclusive da paralisação total e definitiva das atividades, como mostra a ANM (2023) em sua legislação.

Utilizando essa estimativa, o planejamento da manutenção para o cenário de maior criticidade deveria prever, no mínimo, a capacidade de 2 recursos em tempo integral para realização das manutenções corretivas emergenciais.

Como base de cálculo, para essa estimativa, considera-se o valor de homem-hora trabalhado de 6,4h diária (80% de utilização para 8h trabalhadas diárias) e deve ser levado em conta que esse tipo de manutenção não extrapole custos, pois pode requerer mais que uma mão-de-obra (ARAÚJO, 2017; VIANA; RIBEIRO, 2017; LIMA, 2020; VITONTO; REGATTIERI, 2021).

## 5 CONCLUSÕES

A aplicação do Método Monte Carlo para análise de previsibilidade com manutenção de postes de sirenes em barragens de rejeitos mostrou-se eficaz por traçar a tendência de cenários de falhas futuras, baseado no histórico, com oscilações estatisticamente previstas através da geração de números aleatórios.

A metodologia implementada para aplicação do método Monte Carlo, ao conjunto de falhas dos postes de sirene em barragens de rejeitos de mineração com intuito de previsibilidade de falhas, considerando os cenários pessimista e otimista foi validada e permite o direcionamento da manutenção de forma assertiva e pode ser expandida através do incremento de dados mês a mês.

Além disso, a elevação do número de falhas críticas após a realização dos simulados práticos de emergência, podem vir a caracterizar uma especificação de projeto tecnicamente inadequada para a condição de aplicabilidade dos componentes eletrônicos das sirenes.

A abrangência do método Monte Carlo na indústria pode ser confirmada por se tratar de um método estatístico e diversas possibilidades de aplicação para problemas em que deseja estimar condições futuras para tomada de decisão.

A aplicação do Método Monte Carlo para planejamento e controle da manutenção necessita de realimentar os novos dados de falhas para garantia de utilização das técnicas de manutenção assertivas respeitando uma periodicidade determinada através da previsibilidade estabelecida.

Com relação à manutenção das barragens de rejeitos, a aplicabilidade do método Monte Carlo mostrou que pode nortear a estratégia de manutenção aplicada à indústria de mineração e não só, limitada a esse ramo; através de uma base histórica robusta, identificação das variáveis a serem analisadas e o aspecto primordial a ser considerado referente ao risco associado a segurança das comunidades em torno das barragens

Por fim, a aplicação do Método Monte Carlo, atende aos preceitos que alicerça as determinações legais da ANM (2023) para a condição de manutenção e prevenção de sinistros nas barragens de rejeitos da mineração.

## 5.1 Sugestão de trabalhos futuros

Como próximo passo de abrangência desse trabalho poder-se-ia realizar aplicação da manutenção centrada na confiabilidade e o desenvolvimento de modelos matemáticos que representem o comportamento estatístico dos modos de falha dos equipamentos, que sejam capazes de simular a influência das diversas atividades de manutenção sobre os mecanismos de falhas e as funções da instalação dessas sirenes.

Implementar um algoritmo para verificação do padrão de distribuição dos dados por meio de cálculos estatísticos e aplicação do método de Monte Carlo de forma automática, a partir dos dados disponíveis nos painéis de monitoramento existentes na ferramenta Microsoft Power BI ou até mesmo através da busca dos dados originais oriundos do Sistema de Supervisão e Controle.

Por fim, expandir essa metodologia para outros processos de manutenção correlatos, uma vez que o método de Monte Carlo pode ser aplicado para a solução de diferentes tipos de problemas.

## REFERÊNCIAS

ABU-EL-HAJ, Gabriela Farias. Aplicação de regulação responsiva e redes de governança na regulação da segurança de barragens de rejeitos de mineração no Brasil. **Revista de Direito Setorial e Regulatório, Brasília**, v. 6, n. 1, p. 68-98, 2020. Disponível em: <<https://periodicos.unb.br/index.php/rdsr/article/download/31232/25948/70733>> Acesso em 25 março 2022.

AMORIM, Fernando Rodrigues de et al. Análise dos riscos em projetos: uma aplicação do método de Monte Carlo em uma empresa do setor moveleiro. **Future Studies Research Journal: Trends and Strategies**, v. 10, n. 2, p. 332-357, 2018. Disponível em: <<https://www.revistafuture.org/FSRJ/article/view/314/426>> Acesso em 15 março 2022.

ANM, Agência Nacional de Mineração. **Barragens**. 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br>> Acesso em 25 março 2022.

ANM, Agência Nacional de Mineração. Resolução nº13 de 08 de agosto de 2019. Disponível em: <[https://www.snisb.gov.br/Entenda\\_Mais/legislacao-aplicada/anm-resolucao-no-13-de-08-de-agosto-de-2019.pdf](https://www.snisb.gov.br/Entenda_Mais/legislacao-aplicada/anm-resolucao-no-13-de-08-de-agosto-de-2019.pdf)> Acesso em 25 de novembro de 2022.

ARAÚJO, Francisco de Assis Ramos. **Proposta de implantação do planejamento e Controle da manutenção em fábrica de embalagens plásticas flexíveis**. 2017. Disponível em: <<https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/pcmcorrigido.pdf>> Acesso em 25 março 2022.

ARAÚJO, Isabela Gasparino; GOMES, Fabrício Maciel; PEREIRA, Félix Monteiro. Aplicação do método de Monte Carlo para previsão do índice de Overall Equipment Effectiveness de uma máquina produtora de celulose. **Revista Sistemas & Gestão**, v. 15, n. 1, p. 25-37, 2020. Disponível em: <<https://www.revistasg.uff.br/sg/article/view/1608/1266>> Acesso em 15 março 2022.

BARBOSA, Anderson Henrique; FREITAS, Marcílio Sousa da Rocha; NEVES, Francisco de Assis das. Confiabilidade estrutural utilizando o método de Monte Carlo e redes neurais. **REM: Revista Escola de Minas**, v. 58, n. 3, p. 247-255, 2005. Disponível em: <<https://www.scielo.br/pdf/rem/v58n3/v58n3a11.pdf>> Acesso em 15 março 2022.

BARCELOS, Gabriel Jhonatas Natalino; LAGE, José Rafael Duarte; CORDEIRO, Juni Silveira. Caracterização das barragens de rejeitos de mineração no Brasil. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 3, p.1-17, 2020. Disponível em: <<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/2478/2008>> Acesso em 25 março 2022.

BRASIL, Luana Melody; PIRES, Victor. O que a lama nos deixou: reflexões sobre a tragédia de Mariana, a mídia e a mineração no Brasil. **Chroniques des Amériques**, v. 17, n. 3a, p. 1-10, 2017. Disponível em:

<[https://www.erigal.org/img\\_system/erigal\\_082017\\_luana.pdf](https://www.erigal.org/img_system/erigal_082017_luana.pdf)> Acesso em 25 março 2022.

CAITANO, Thamires Beatriz dos Santos; SILVA, Evaldo Raimundo Pinto da; ALVES, Camila Nascimento. Caracterização e análise de segurança das barragens de mineração de ferro situadas no estado do Pará, Brasil. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 3, p.1-16, 2021. Disponível em: <<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/13384/12071>> Acesso em 25 março 2022.

CARVALHO, Sérgio. **Estatística Básica Aplicada**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2008.

CASTANHEIRA, Nelson Pereira. **Estatística aplicada a todos os níveis**. Curitiba: Intersaberes, 2012.

CORREA, Lucas Miranda e Castro *et al.* Estudo dos requisitos necessários para a segurança em uma barragem de rejeitos. **Revista Tecer**, v. 13, n. 24, p. 22- 34, 2020. Disponível em: <<https://www.metodista.br/revistas/revistas-izabela/index.php/tec/article/view/2046>> Acesso em 25 março 2022.

FARAHANI, Ameneh; TOHIDI, Hamid. Integrated optimization of quality and maintenance: A literature review. **Computers & Industrial Engineering**, v. 151, n1, p. 1-24, 2021. Disponível em: <[https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835220306082?casa\\_token=X2UdtcPLa2AAAAAA:mT-2jz\\_QAZGqPQI\\_MPf6JwJRnNag6\\_59qOf6Yhx1xX2T5cwXCYTxoixuyim3Lak7wQj3AW2z1Q](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835220306082?casa_token=X2UdtcPLa2AAAAAA:mT-2jz_QAZGqPQI_MPf6JwJRnNag6_59qOf6Yhx1xX2T5cwXCYTxoixuyim3Lak7wQj3AW2z1Q)> Acesso em 25 março 2022.

FILHO, Frederico Ferreira Campos. **Algoritmos Numéricos**. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

GLAWAR, Robert *et al.* An approach for the integration of anticipative maintenance strategies within a production planning and control model. **Procedia CIRP**, v. 67, n. 1, p. 46-51, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827117311162>> Acesso em 25 março 2022.

IBRAM, Instituto Brasileiro de Mineração. **Desempenho da mineração tem queda em 2022, mas setor cria mais empregos e aumentará investimentos para US\$ 50 bi até 2027**. 2023. Disponível em: <<https://ibram.org.br/noticia/desempenho-da-mineracao-tem-queda-em-2022-mas-setor-cria-mais-empregos-e-aumentara-investimentos-para-us-50-bi-ate-2027/#:~:text=Produ%C3%A7%C3%A3o%20e%20faturamento,%E2%80%93%20uma%20queda%20de%2026%25.>>> Acesso em 10 abril 2023.

KUMAR, Sandeep; KUMAS LAD, Bhupesh. Integrated production and maintenance planning for parallel machine system considering cost of rejection. **Journal of the Operational Research Society**, v. 68, n. 7, p. 834-846, 2017. Disponível em: <<https://link.springer.com/content/pdf/10.1057/jors.2016.46.pdf>> Acesso em 25 março 2022.

LIMA, Adriene de Freitas. Planejamento e Controle da Manutenção: um estudo de melhoria em uma empresa do setor moveleiro em Iranduba-AM. **ConBRepro**. De 02 a 04 de dezembro de 2020. Disponível em: <[https://aprepro.org.br/conbrepro/2020/anais/arquivos/09272020\\_130937\\_5f70bc11673e3.pdf](https://aprepro.org.br/conbrepro/2020/anais/arquivos/09272020_130937_5f70bc11673e3.pdf)> Acesso em 25 março 2022.

LUNA, Adrian Hinojosa. **Introdução aos Métodos de Monte Carlo Avançados**. Disponível em: <[http://www.est.ufmg.br/portal/arquivos/rts/RTE\\_01\\_2019.pdf](http://www.est.ufmg.br/portal/arquivos/rts/RTE_01_2019.pdf)> Acesso em 15 março 2022.

MARSHALL, Judith J. Rompimentos de barragens de rejeitos no Brasil e no Canadá: uma análise do comportamento corporativo. **Caderno Eletrônico de Ciências Sociais: Cadecs**, v. 5, n. 1, p. 27-46, 2017. Disponível em: <<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6230519>> Acesso em 25 março 2022.

MARTINS, Ernane Rosa. **Utilização da simulação de Monte Carlo na gestão de estoques**. Disponível em: <<https://downloads.editoracientifica.org/articles/200801053.pdf>> Acesso em 15 março 2022.

MINAS GERAIS, GOVERNO. **Histórico do rompimento das barragens da Vale na Mina Córrego do Feijão**. 2023. Disponível em: <<https://www.mg.gov.br/pro-brumadinho/pagina/historico-do-rompimento-das-barragens-da-vale-na-mina-corrego-do-feijao>> Acesso em 10 abril 2023.

MISHRA, Aseem K. *et al.* Joint optimization of production scheduling and group preventive maintenance planning in multi-machine systems. **Annals of Operations Research**, 2021. Disponível em: <<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10479-021-04362-z.pdf>> Acesso em 25 março 2022.

MOURTZIS, Dimitris *et al.* Integrated production and maintenance scheduling through machine monitoring and augmented reality: An Industry 4.0 approach. **IFIP International For Information Prossesing (Springer)**, 2017. Disponível em: <[https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-319-66923-6\\_42.pdf](https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-319-66923-6_42.pdf)> Acesso em 25 março 2022.

OLIVEIRA, Lucas Guedes de; PAIVA, Emerson José de; PAIVA, Anderson Paulo de. Aplicação do método de Monte Carlo para a previsão de falhas: uma ferramenta de apoio à gestão da manutenção. **Revista Produção Online**, v. 19, n. 1, p. 72-101, 2019. Disponível em: <<https://www.producaoonline.org.br/rpo/article/view/3091>> Acesso em 15 março 2022.

OLIVEIRA, Valdir Castro; OLIVEIRA, Daniela de Castro. A semântica do eufemismo: mineração e tragédia em Brumadinho. **Revista Eletrônica de Comunicação, Informação e Inovação em Saúde**, v. 13, n. 1, p. 13-38, 2019. Disponível em: <<https://homologacao-reciis.icict.fiocruz.br/index.php/reciis/article/view/1783>> Acesso em 25 março 2022.

PAULA, Renato Ricardo de. **Método de Monte Carlo e aplicações**. 2014. 83 f. [Trabalho de Conclusão de Curso em Matemática com ênfase em Matemática Computacional]. Volta Redonda: UFF, 2014. Disponível em: <<https://app.uff.br/riuff/handle/1/4180>> Acesso em 15 março 2022.

RESENDE, Úrsula do Carmo. **Métodos Numéricos**. Belo Horizonte: CEFET-MG/UFSJ, 2018.

RIBEIRO, José Cláudio Junqueira *et al.* A Mineração no Estado do Pará e as Barragens de Rejeito: o paradigma entre a exploração e os impactos negativos decorrentes. In: **V Congresso Internacional de Direito Ambiental**. 2018. Disponível em: <<http://revista.domhelder.edu.br/index.php/congressodireitoambiental/article/view/1360>> Acesso em 25 março 2022.

RODRIGUES, Luíz Gustavo Miguel. **Estudos das causas, impactos e legislação relacionadas ao rompimento de barragens de rejeitos no Brasil**. 2019. 27 f. [Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Segurança do Trabalho]. Lavras: UNILAVRAS, 2019. Disponível em: <<http://dspace.unilavras.edu.br/bitstream/123456789/426/1/TCC%20Lu%c3%adz%20Gustavo.pdf>> Acesso em 25 março 2022.

SABBO, Gabriela Rodrigues; ASSIS, Milena Maria Graciano de; BERTEQUINI, Aline Botini Tavares. Barragens de retenção de rejeitos de mineração. **Revista Engenharia em Ação UniToledo**, v. 2, n. 1, p. 3-15, 2017. Disponível em: <<http://ojs.toledo.br/index.php/engenharias/article/view/2542/147>> Acesso em 25 março 2022.

SARAIVA JR., Abraão Freires; TABOSA, Cristiane de Mesquita; COSTA, Reinaldo Pacheco da. Simulação de Monte Carlo aplicada à análise econômica de pedido. **Produção**, v. 21, n. 1, p. 149-164, 2011. Disponível em: <[https://www.scielo.br/pdf/prod/2011nahead/aop\\_t6\\_0003\\_0208.pdf](https://www.scielo.br/pdf/prod/2011nahead/aop_t6_0003_0208.pdf)> Acesso em 15 março 2022.

SETEC, Consult Group. **Entendendo a normalidade de dados**. 2023. Disponível em: <<https://setecnet.com.br/home/entendendo-normalidade-dados/#:~:text=Teste%20de%20normalidade%20de%20Ryan%2DJoiner,-Este%20teste%20avalia&text=A%20estat%C3%ADstica%20de%20Ryan%2DJoiner,Wilk%20e%20considera%20o%20arredondamento.>> Acesso em 18 maio 2023.

SOUZA JUNIOR, Tennison Freire de; MOREIRA, Eclesielter Batista; HEINECK, Karla Salvagni. Barragens de contenção de rejeitos de mineração no Brasil. **Holos**, v. 5, n.1, p. 1-39, 2018. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/187208/001082176.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> Acesso em 25 março 2022.

THOMÉ, Romeu; LAGO, Talita Martins Oliveira. Barragens de rejeitos da mineração: o princípio da prevenção e a implementação de novas alternativas. *Revista de Direito Ambiental*, v. 85, p. 17-39, 2017. Disponível em:

<[https://www.academia.edu/download/58385119/Barragens\\_de\\_rejeitos\\_da\\_mineracao\\_e\\_prevencao\\_-\\_2017.pdf](https://www.academia.edu/download/58385119/Barragens_de_rejeitos_da_mineracao_e_prevencao_-_2017.pdf)> Acesso em 25 março 2022.

THOMÉ, Romeu; PASSINI, Matheus Leonardo. Barragens de rejeitos de mineração: características do método de alteamento para montante que fundamentaram a suspensão de sua utilização em Minas Gerais. *Ciências Sociais Aplicadas em Revista*, v. 18, n. 34, p. 49-65, 2018. Disponível em: <<http://saber.unioeste.br/index.php/csaemrevista/article/view/19480>> Acesso em 25 março 2022.

VARGAS, J. C.; CRUZ-CARPIO, Carlos Andrés. Estudio del método Monte Carlo en simulaciones para la estimación del valor de  $\pi$ . **Revista Boliviana de Física**, v. 36, n. 36, p. 26-32, 2020. Disponível em: <[http://www.scielo.org.bo/pdf/rbf/v36n36/v36n36\\_a05.pdf](http://www.scielo.org.bo/pdf/rbf/v36n36/v36n36_a05.pdf)> Acesso em 15 março 2022.

VIANA, Herbert Ricardo Garcia; RIBEIRO, José Luis Duarte. Fatores de sucesso na gestão da manutenção em empresas mineradoras. *Revista Gestão Industrial*. v.15, n.2, p.1-20, 2017. Disponível em: <[https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/31122/1/FatoresdeSucesso\\_Viana\\_2017.pdf](https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/31122/1/FatoresdeSucesso_Viana_2017.pdf)> Acesso em 25 março 2022.

VITONTO, Alan William; REGATTIERI, Carlos Roberto. Planejamento e controle da manutenção para aumento na produtividade e redução de custos. **Revista Interface Tecnológica**, v. 18, n. 1, p. 546-554, 2021. Disponível em: <<https://revista.fatectq.edu.br/index.php/interfacetecnologica/article/view/1123/649>> Acesso em 25 março 2022.

WAN, Shan *et al.* A collaborative machine tool maintenance planning system based on content management technologies. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 94, n. 5, p. 1639-1653, 2018. Disponível em: <<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00170-016-9829-0.pdf>> Acesso em 25 março 2022.

YORIYAZ, Hélio. Método de Monte Carlo: princípios e aplicações em Física Médica. **Revista Brasileira de Física Médica**. V.3, n;1, p. 141-149, 2009. Disponível em: <<https://www.ipen.br/biblioteca/2009/14528.pdf>> Acesso em 15 março 2022.

ZUCHERATTO JÚNIOR, Luiz Nelson. **Revisão bibliográfica sobre segurança em barragens de terra por meio de instrumentação geotécnica**. 2021. 46 f. [Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Controle e Automação]. Disponível em: <[https://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/3813/3/MONOGRAFIA\\_Revis%c3%a3oBibliogr%c3%a1ficaSeguran%c3%a7a.pdf](https://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/3813/3/MONOGRAFIA_Revis%c3%a3oBibliogr%c3%a1ficaSeguran%c3%a7a.pdf)> Acesso em 25 março 2022.

### ANEXO A - Estatística de falhas totais por mês

Amostras	Mês	Quantidade de falhas					Y (reta)	Δ
		Capacidade sonora reduzida	Erro crítico	Erro comunicação	Erro não crítico	Total de Falhas (TF)		
0	ago/20	128	594	183	8	913	1010,6	97,6
1	set/20	132	100	186	38	456	993,668	537,668
2	out/20	116	114	150	17	397	976,736	579,736
3	nov/20	346	243	328	6	923	959,804	36,804
4	dez/20	609	224	711	2	1546	942,872	603,128
5	jan/21	562	207	474	2	1245	925,94	319,06
6	fev/21	416	126	276	2	820	909,008	89,008
7	mar/21	440	221	382	6	1049	892,076	156,924
8	abr/21	452	260	458	6	1176	875,144	300,856
9	mai/21	477	206	461	3	1147	858,212	288,788
10	jun/21	399	103	345	3	850	841,28	8,72
11	jul/21	324	118	483	3	928	824,348	103,652
12	ago/21	270	52	439	7	768	807,416	39,416
13	set/21	191	191	398	4	784	790,484	6,484
14	out/21	325	191	361	7	884	773,552	110,448
15	nov/21	404	164	275	0	843	756,62	86,38
16	dez/21	357	183	153	4	697	739,688	42,688
17	jan/22	381	164	160	5	710	722,756	12,756
18	fev/22	345	78	109	3	535	705,824	170,824
19	mar/22	313	90	77	7	487	688,892	201,892
20	abr/22	256	163	58	11	488	671,96	183,96
21	mai/22	426	184	190	3	803	655,028	147,972
22	jun/22	261	129	240	1	631	638,096	7,096
23	jul/22	258	85	187	0	530	621,164	91,164
24	ago/22	189	118	260	4	571	604,232	33,232
25	set/22	232	137	126	2	497	587,3	90,3
26	out/22	382	242	89	21	734	570,368	163,632
27	nov/22	208	133	129	0	470	553,436	83,436
28	dez/22	190	163	188	10	551	536,504	14,496

Fonte: Autor (2023)

### ANEXO B - Estatística de falhas críticas por mês

Amostras	Mês	Erro Crítico	Y (reta)	$\Delta$
0	ago/20	594	230,57	363,43
1	set/20	100	226,3744	126,3744
2	out/20	114	222,1788	108,1788
3	nov/20	243	217,9832	25,0168
4	dez/20	224	213,7876	10,2124
5	jan/21	207	209,592	2,592
6	fev/21	126	205,3964	79,3964
7	mar/21	221	201,2008	19,7992
8	abr/21	260	197,0052	62,9948
9	mai/21	206	192,8096	13,1904
10	jun/21	103	188,614	85,614
11	jul/21	118	184,4184	66,4184
12	ago/21	52	180,2228	128,2228
13	set/21	191	176,0272	14,9728
14	out/21	191	171,8316	19,1684
15	nov/21	164	167,636	3,636
16	dez/21	183	163,4404	19,5596
17	jan/22	164	159,2448	4,7552
18	fev/22	78	155,0492	77,0492
19	mar/22	90	150,8536	60,8536
20	abr/22	163	146,658	16,342
21	mai/22	184	142,4624	41,5376
22	jun/22	129	138,2668	9,2668
23	jul/22	85	134,0712	49,0712
24	ago/22	118	129,8756	11,8756
25	set/22	137	125,68	11,32
26	out/22	242	121,4844	120,5156
27	nov/22	133	117,2888	15,7112
28	dez/22	163	113,0932	49,9068

Fonte: Autor (2023)

### ANEXO C - Estatística de falhas totais por mês separadas por quartis

Amostras	Mês	Quantidade de falhas				
		Capacidade sonora reduzida	Erro crítico	Erro comunicação	Erro não crítico	Total de Falhas (TF)
2	out/20	116	114	150	17	397
1	set/20	132	100	186	38	456
27	nov/22	208	133	129	0	470
19	mar/22	313	90	77	7	487
20	abr/22	256	163	58	11	488
25	set/22	232	137	126	2	497
23	jul/22	258	85	187	0	530
18	fev/22	345	78	109	3	535
28	dez/22	190	163	188	10	551
24	ago/22	189	118	260	4	571
22	jun/22	261	129	240	1	631
16	dez/21	357	183	153	4	697
17	jan/22	381	164	160	5	710
26	out/22	382	242	89	21	734
12	ago/21	270	52	439	7	768
13	set/21	191	191	398	4	784
21	mai/22	426	184	190	3	803
6	fev/21	416	126	276	2	820
15	nov/21	404	164	275	0	843
10	jun/21	399	103	345	3	850
14	out/21	325	191	361	7	884
0	ago/20	128	594	183	8	913
3	nov/20	346	243	328	6	923
11	jul/21	324	118	483	3	928
7	mar/21	440	221	382	6	1049
9	mai/21	477	206	461	3	1147
8	abr/21	452	260	458	6	1176
5	jan/21	562	207	474	2	1245
4	dez/20	609	224	711	2	1546

<b>Legenda</b>	1º quartil
	2º quartil ou mediana
	3º quartil
	4º quartil ou limite máximo

Fonte: Autor (2023)