



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

GRAZIELA DE SOUSA CAVALCANTE

**ANÁLISE DE FALHAS E CONFIABILIDADE OPERACIONAL DE
EQUIPAMENTOS DE UMA USINA HIDRELÉTRICA: ESTUDO APLICADO À BASE
DE DADOS DE MANUTENÇÃO**

**Tucuruí – PA
2026**

GRAZIELA DE SOUSA CAVALCANTE

**ANÁLISE DE FALHAS E CONFIABILIDADE OPERACIONAL DE
EQUIPAMENTOS DE UMA USINA HIDRELÉTRICA: ESTUDO APLICADO À BASE
DE DADOS DE MANUTENÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Mecânica do Campus de
Tucuruí, como parte dos requisitos para obtenção do
título Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador:
Prof. Msc. Ronaldo Raposo de Moura

**Tucuruí – PA
2026**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD Sistema de
Bibliotecas da Universidade Federal do Pará**
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- C376a Cavalcante, Graziela de Sousa.
Análise de Falhas e confiabilidade operacional de equipamentos de uma
usina hidrelétrica : estudo aplicado à base de dados de manutenção /
Graziela de Sousa Cavalcante. — 2026.
41 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Me. Ronaldo Raposo de Moura
Trabalho de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Campus
Universitário de Tucuruí, Faculdade de Engenharia Mecânica, Tucuruí,
2026.
1. confiabilidade. 2. manutenção industrial. 3. usina hidrelétrica. 4.
análise de falhas. 5. criticidade. I. Título.

CDD 620.00452

GRAZIELA DE SOUSA CAVALCANTE

**ANÁLISE DE FALHAS E CONFIABILIDADE OPERACIONAL DE
EQUIPAMENTOS DE UMA USINA HIDRELÉTRICA: ESTUDO APLICADO À BASE
DE DADOS DE MANUTENÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Mecânica do Campus de
Tucuruí, como parte dos requisitos para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Data da aprovação: 08/07/2026

Conceito: Excelente

BANCA EXAMINADORA

Orientador

Msc. Ronaldo Raposo de Moura – UFPA

Membro Interno

Dr. Fernando Nunes da Silva – UFPA

Membro Interno

Dr. Maciel da Costa Furtado – UFPA

ANÁLISE DE FALHAS E CONFIABILIDADE OPERACIONAL DE EQUIPAMENTOS DE UMA USINA HIDRELÉTRICA: ESTUDO APLICADO À BASE DE DADOS DE MANUTENÇÃO

RESUMO

A confiabilidade operacional de equipamentos em usinas hidrelétricas é fundamental para garantir a continuidade da geração de energia e a eficiência dos sistemas produtivos. Nesse contexto, a gestão da manutenção baseada na análise de falhas e na priorização de ativos constitui ferramenta essencial para redução da indisponibilidade e otimização de recursos. O presente trabalho teve como objetivo avaliar a confiabilidade operacional dos sistemas de uma usina hidrelétrica, por meio da análise de registros históricos de falhas, tempo de parada e custos de manutenção, visando identificar sistemas críticos e propor melhorias na estratégia de manutenção. A metodologia adotada envolveu o tratamento e padronização da base de dados, seguido da aplicação da análise de Pareto para identificação dos sistemas com maior concentração de falhas. Posteriormente, foi elaborada uma matriz de criticidade considerando frequência de falhas, tempo total de parada e impacto econômico. Também foi realizada a identificação de equipamentos repetidores, com o objetivo de avaliar a recorrência de falhas e seu impacto na disponibilidade operacional. Os resultados evidenciaram concentração significativa de falhas em sistemas específicos. O Sistema do Gerador (SGE) apresentou maior frequência de falhas e maior impacto operacional, caracterizando criticidade associada à recorrência. Já o sistema da Subestação Blindada (SEB) apresentou menor frequência, porém maior custo e maior tempo médio de reparo, indicando falhas de maior severidade. Observou-se ainda que, embora a usina possua plano estruturado de manutenção preventiva, não há uma metodologia formal consolidada para manutenção preditiva e análise de causa raiz, o que limita a eliminação definitiva de falhas recorrentes. Com base nos resultados, foram propostas melhorias voltadas à otimização do plano preventivo, fortalecimento da manutenção baseada em condição e implantação de procedimentos estruturados de análise de causa raiz. Conclui-se que a priorização baseada em dados contribui para o aumento da confiabilidade operacional, redução de falhas recorrentes e melhoria da gestão da manutenção em sistemas de geração hidrelétrica.

Palavras-chave: confiabilidade; manutenção industrial; usina hidrelétrica; análise de falhas; criticidade.

FAILURE ANALYSIS AND OPERATIONAL RELIABILITY OF EQUIPMENT IN A HYDROPOWER PLANT: A STUDY APPLIED TO THE MAINTENANCE DATABASE

ABSTRACT

Operational reliability of equipment in hydroelectric power plants is essential to ensure the continuity of electricity generation and the efficiency of production systems. In this context, maintenance management based on failure analysis and asset prioritization is a fundamental tool for reducing downtime and optimizing maintenance resources. This study aimed to evaluate the operational reliability of the systems of a hydroelectric power plant through the analysis of historical records of failures, downtime, and maintenance costs, with the objective of identifying critical systems and proposing improvements to the maintenance strategy. The adopted methodology involved data cleaning and standardization, followed by the application of Pareto analysis to identify the systems with the highest concentration of failures. Subsequently, a criticality matrix was developed considering failure frequency, total downtime, and economic impact. In addition, recurring equipment failures were identified in order to evaluate failure recurrence and its effect on operational availability. The results revealed a significant concentration of failures in specific systems. The Generator Sistem (SGE) exhibited the highest failure frequency and the greatest operational impact, characterizing criticality associated with recurrent failures. In contrast, the Enclosed Substation (SEB) system showed a lower failure frequency but the highest maintenance cost and the longest mean repair time, indicating failures of greater severity. It was also observed that, although the power plant has a well-established preventive maintenance program, it lacks a formal methodology for predictive maintenance and root cause analysis, which limits the permanent elimination of recurring failures. Based on these findings, improvements were proposed to optimize the preventive maintenance plan, strengthen condition-based maintenance practices, and implement structured root cause analysis procedures. It is concluded that data-driven prioritization contributes to increased operational reliability, reduced recurrence of failures, and improved maintenance management in hydroelectric power generation systems.

Keywords: *operational reliability; industrial maintenance; hydroelectric power plant; failure analysis; criticality.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Matriz de criticidade dos sistemas baseada na frequência de falhas e impacto operacional/econômico.	25
Figura 2 - Gráfico de Pareto por Frequência de Falhas.	27
Figura 3 - Gráfico de Pareto por Tempo Total de Parada.	29
Figura 4 - Gráfico de Pareto por Custos.	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de registros da base de dados.....	23
Tabela 2 - Tagueamento do sistema.....	23
Tabela 3 - MTTR/h do SGE e SEB.	29
Tabela 4 - Custo médio por falha SGE e SEB.....	31
Tabela 5 - Matriz de Criticidade dos Sistemas	31
Tabela 6 - Equipamentos repetidores do sistema SGE.....	32
Tabela 7 - Equipamentos repetidores do sistema SEB.	33

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	Contextualização geral	11
1.2	Objetivo geral.....	11
1.2.1	Objetivos específicos.....	11
1.3	Delimitação do estudo.....	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	Manutenção industrial e evolução das abordagens	13
2.2	Tipos e estratégias de manutenção	13
2.2.1	Manutenção corretiva	13
2.2.2	Manutenção preventiva.....	14
2.2.3	Manutenção preditiva ou manutenção baseada em condição	15
2.3	Manutenção centrada em confiabilidade.....	15
2.4	Confiabilidade, disponibilidade e manutenabilidade	15
2.4.1	Confiabilidade	15
2.4.2	Disponibilidade.....	16
2.4.3	Manutenabilidade	16
2.5	Indicadores de manutenção e uso gerencial	16
2.6	Análise de falhas e princípio de Pareto na manutenção.....	17
2.7	Criticidade de ativos	17
2.8	Matriz de criticidade	18
2.9	Custos da manutenção.....	18
2.10	Contextualização da usina hidrelétrica.....	18
2.11	Descrição dos principais sistemas de uma usina hidrelétrica	19
2.11.1	Sistema de geração – turbina e gerador	19
2.11.2	Sistema de excitação e controle	20
2.11.3	Sistemas auxiliares mecânicos.....	20
2.11.4	Sistemas elétricos auxiliares, de supervisão e controle e proteção.....	21
3	METODOLOGIA.....	22
3.1	Caracterização dos dados.....	22
3.2	Tratamento dos dados	22

3.3	Construção da Matriz de Criticidade	24
3.4	Justificativa metodológica	25
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
4.1	Análise de Pareto por frequência de falhas	27
4.2	Análise de Pareto por Duração de Parada	28
4.3	Análise de Pareto por Custos	30
4.4	Matriz de Criticidade	31
4.5	Análise dos sistemas críticos	32
4.5.1	Equipamentos repetidores	32
4.6	Relação entre falha e custo.....	34
4.7	Melhorias Propostas	35
4.7.1	Melhoria na qualidade dos registros de manutenção	35
4.7.2	Melhorias direcionadas ao sistema SGE.....	35
4.7.3	Melhorias direcionadas ao sistema SEB.....	36
4.7.4	Estratégia integrada de manutenção	37
4.7.5	Implantação de estrutura formal de análise de causa raiz.....	38
5	CONCLUSÃO	39
	REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização geral

A confiabilidade operacional de sistemas industriais constitui um fator determinante para a continuidade produtiva, segurança e desempenho econômico das organizações. Em ambientes industriais de alta complexidade, a ocorrência de falhas em equipamentos pode resultar em paradas não programadas, aumento de custos de manutenção e impactos significativos na eficiência operacional (KARDEC; NASCIF, 2009).

Nesse cenário, a manutenção evoluiu de uma abordagem predominantemente corretiva para estratégias estruturadas de prevenção e monitoramento, apoiadas por indicadores de desempenho e análise de falhas. A gestão moderna da manutenção busca não apenas restaurar equipamentos após falhas, mas antecipar eventos indesejados, reduzir indisponibilidade e otimizar a alocação de recursos (KARDEC; NASCIF, 2009).

A aplicação de métodos analíticos, como priorização por criticidade e avaliação de registros históricos, permite compreender padrões de falha e direcionar intervenções com maior eficácia. Dessa forma, a manutenção assume caráter estratégico, contribuindo diretamente para a confiabilidade e sustentabilidade operacional dos sistemas industriais.

1.2 Objetivo geral

Avaliar a confiabilidade operacional dos sistemas de equipamentos industriais por meio de análise de falhas, impacto operacional e custo, propondo melhorias na estratégia de manutenção.

1.2.1 Objetivos específicos

- Analisar a frequência de falhas dos sistemas de equipamentos industriais;
- Avaliar o impacto operacional das falhas por meio do tempo de parada dos equipamentos;
- Quantificar os custos associados às falhas e às interrupções operacionais;
- Determinar a criticidade dos sistemas com base nos indicadores de falha, impacto operacional e custo;
- Identificar os equipamentos críticos e com maior recorrência de falhas;

- Propor melhorias na estratégia de manutenção visando aumentar a confiabilidade operacional dos sistemas.

1.3 Delimitação do estudo

O presente estudo concentra-se na análise da confiabilidade operacional de sistemas e equipamentos de uma usina hidrelétrica, utilizando registros históricos de falhas, tempo de parada e custos de manutenção. A abordagem adotada privilegia análise estatística e interpretativa dos dados disponíveis, sem contemplar modelagem física dos equipamentos ou implementação prática das melhorias propostas.

O trabalho limita-se à priorização técnica de sistemas e à proposição de recomendações de manutenção, não abrangendo aspectos de gestão financeira global ou planejamento energético da usina.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Manutenção industrial e evolução das abordagens

O conceito predominante de que a missão da manutenção é de reestabelecer as condições originais do equipamento/sistema é passado para algumas empresas, mas ainda é realidade para outras. Atualmente, a missão da manutenção é garantir confiabilidade e a disponibilidade da função dos equipamentos e instalações de modo a atender a um processo de produção ou de serviço, com segurança, preservação do meio ambiente e custos adequados (KARDEC; NASCIF, 2009).

Desde os anos 30, a evolução da manutenção pode ser investigada através de 3 gerações. Na primeira, antes da Segunda Guerra, a indústria não era altamente mecanizada, portanto, os períodos de paralização à espera de recuperação de falhas não eram muito importantes. Isso significa que a prevenção contra falhas não eram uma prioridade alta na mente da maioria dos gerentes (MOUBRAY, 2000).

Já na segunda fase, pós Segunda Guerra, as pressões do período aumentaram a demanda por todo tipo de produtos, ao mesmo tempo em que o contingente de mão de obra industrial diminuiu. Como consequência, naquele período houve um forte aumento na mecanização, bem como da complexidade das instalações industriais. A indústria estava bastante dependente do bom funcionamento das máquinas e isto levou ideia de que falhas em equipamentos poderiam e deveriam ser evitadas, o que resultou no conceito de manutenção preventiva (KARDEC; NASCIF, 2009).

Na terceira geração, a partir da década de 70, acelerou-se o processo de mudança das indústrias. O crescimento da automação e da mecanização passou a indicar que a confiabilidade e disponibilidade tornaram-se pontos chave em setores tão distintos quanto saúde, processamento de dados, telecomunicações e gerenciamento de edificações. Na terceira geração reforçou-se o conceito de manutenção preditiva e o de confiabilidade passa a ser cada vez mais aplicado pela engenharia de manutenção (KARDEC; NASCIF, 2009).

2.2 Tipos e estratégias de manutenção

2.2.1 Manutenção corretiva

A manutenção corretiva é a atuação para a correção da falha ou desempenho menor que o esperado. Assim, a manutenção corretiva não é, necessariamente, a manutenção de emergência. Podemos ter duas condições que levam à manutenção corretiva: em que o equipamento apresenta desempenho deficiente apontado pelo acompanhamento das variáveis operacionais e quando há a ocorrência da falha. (KARDEC; NASCIF, 2009).

Podemos dividir a Manutenção Corretiva em Manutenção Corretiva Não Planejada e Planejada. Na corretiva não planejada ocorre a atuação da manutenção em um fato já ocorrido, não há tempo para a preparação do serviço. Normalmente implica em custos altos, visto que a quebra inesperada pode acarretar perdas de produção, na qualidade do produto e elevados custos indiretos de manutenção. Já a corretiva planejada é a correção do desempenho menor do que o esperado ou correção da falha por decisão gerencial. Mesmo que a decisão gerencial seja de deixar o equipamento funcionar até a quebra, essa é uma decisão conhecida e algum planejamento pode ser feito quando a falha ocorrer (KARDEC; NASCIF, 2009).

Do ponto de vista da manutenção, manutenção corretiva é mais barata do que prevenir falhas nos equipamentos. Em compensação, também pode causar grandes perdas por interrupção da produção e se essa interrupção for excessivamente longa, poderá haver prejuízos significativos para a empresa. É importante ressaltar também que, mesmo que a manutenção corretiva tenha sido escolhida por ser mais vantajosa, não se pode conformar com a ocorrência de falhas como um evento já esperado e, mesmo na manutenção corretiva, é fundamental de esforçar para identificar precisamente as causas fundamentais de falhas e bloqueá-las, evitando sua reincidência (XENOS, 1998)

2.2.2 Manutenção preventiva

A manutenção preventiva é a atuação realizada de forma a reduzir ou evitar a falha ou queda no desempenho, obedecendo a um plano previamente elaborado, baseado em intervalos definidos de tempo. Em determinados setores como a aviação, a noção de manutenção preventiva é imperativa para determinados sistemas ou componentes, pois o fator segurança se sobrepõe aos demais (KARDEC; NASCIF, 2009). A vantagem principal é a previsibilidade: planeja-se mão de obra, materiais e janelas de parada.

Se comparada com a corretiva – somente do ponto de vista do custo de manutenção – a manutenção preventiva é mais cara pois as peças têm que ser trocadas e os componentes

reformados antes de atingirem seus limites de vida. Em compensação, a frequência da ocorrência de falhas diminui, a disponibilidade dos equipamentos aumenta e diminuem as interrupções inesperadas da produção. Porém, também pode acontecer que, mesmo com o cumprimento sistemático da manutenção preventiva, as falhas não diminuam. A causa pode estar tanto na falta de padrões e procedimentos de manutenção quanto no conhecimento e habilidades insuficientes dos técnicos de manutenção e operadores da produção (XENOS, 1998).

2.2.3 Manutenção preditiva ou manutenção baseada em condição

A manutenção preditiva, também conhecida por manutenção baseada em condição, é a atuação realizada com base na modificação de parâmetros de condição ou desempenho, cujo acompanhamento obedece a uma sistemática. Seu objetivo é prevenir falhas nos equipamentos ou sistemas através de acompanhamento de parâmetros diversos, permitindo a operação contínua do equipamento pelo maior tempo possível (KARDEC; NASCIF, 2009). Essa abordagem busca maximizar a vida útil do componente e reduzir falhas inesperadas.

Olhando apenas o custo da manutenção, a manutenção preventiva é uma modalidade cara, pois as peças e componentes dos equipamentos são trocadas ou reformadas antes de atingirem seus limites de vida. A manutenção preditiva permite otimizar a troca das peças ou reforma dos componentes e estender o intervalo da manutenção, pois permite prever quando a peça ou componente estarão próximos do seu limite de vida (XENOS, 1998).

2.3 Manutenção centrada em confiabilidade

A Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC/RCM) é um processo usado para determinar o que deve ser feito para assegurar que qualquer ativo físico continue a fazer o que seus usuários querem o que ele faça no seu contexto operacional presente (MOUBRAY, 2001). Devido a sua abordagem racional e sistemática, os programas de MCC tem sido reconhecido como forma mais eficiente de tratar as questões da manutenção. Eles permitem que as empresas alcancem excelência nas atividades da manutenção, ampliando a disponibilidade dos equipamentos e reduzindo custos associados a acidentes, defeitos, reparos e substituições (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

2.4 Confiabilidade, disponibilidade e manutenabilidade

2.4.1 Confiabilidade

A confiabilidade de um item corresponde à sua probabilidade de desempenhar adequadamente o seu propósito especificado, por um determinado período e sob condições ambientais predeterminadas. Em seu sentido mais amplo, confiabilidade está associada à operação bem-sucedida de um produto ou sistema, na ausência de quebras ou falhas. Em análises de engenharia é necessária uma definição quantitativa de confiabilidade, em termos de probabilidade (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

2.4.2 Disponibilidade

A disponibilidade é definida como capacidade de um item, mediante manutenção apropriada, desempenhar sua função requerida em um determinado instante do tempo ou em um período predeterminado. O conceito de disponibilidade varia conforme capacidade de reparo de uma unidade. Em unidades não-reparáveis, os conceitos de disponibilidade e confiabilidade se equivalem. Em unidades reparáveis, os possíveis estados da unidade em um tempo t de análise estão funcionando ou em manutenção (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

2.4.3 Manutenibilidade

Manutenibilidade é definida como a capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, mediante condições preestabelecidas de uso, quando submetido à manutenção sob condições predeterminadas e usando recursos e procedimentos padrão. Ela é um fator essencial no estabelecimento da disponibilidade de uma unidade (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

2.5 Indicadores de manutenção e uso gerencial

Indicadores de desempenho, também conhecidos como KPIs (Key Performance Indicators), são ferramentas de gestão utilizadas para avaliar e monitorar a eficiência e eficácia de processos, projetos, equipes e organizações como um todo. Eles fornecem informações quantitativas sobre o progresso em direção a metas e objetivos definidos. Eles desempenham um papel crucial na gestão da manutenção, particularmente na função "Manter" e servem como ferramentas estratégicas para medir, monitorar e otimizar a performance de equipamentos e sistemas. Alguns dos principais indicadores da manutenção incluem: o MTBF (Mean Time Between Failure ou Tempo Médio Entre as Falhas), o MTTR (Mean Time to Repair ou Tempo Médio de Reparos), o Custo de Manutenção, o Backlog de Manutenção, o OEE (Overall Equipment Effectiveness ou Eficácia Global dos Equipamentos), a Taxa de Falha e o Índice

de Prioridade. Estes destacam uma faceta específica da operação de manutenção que, quando analisados em conjunto, fornecem uma visão panorâmica do desempenho global do departamento de manutenção (OLIVEIRA; VIANA, 2024; TOKEN ENGENHARIA, 2024).

A gestão eficaz de indicadores é crucial para o sucesso das organizações, mas somente quando baseada em dados de alta qualidade. Assegurar a precisão, integridade e consistência dos dados é um processo contínuo que demanda a implementação de boas práticas, ferramentas adequadas e uma forte governança, já que dados inconsistentes, incompletos ou imprecisos podem levar a conclusões errôneas e, conseqüentemente, a decisões empresariais equivocadas. Com uma abordagem sistemática à qualidade dos dados, as empresas podem maximizar o valor dos seus KPIs, promover uma cultura de dados e tomar decisões mais informadas e eficazes. Portanto, garantir a qualidade dos dados é essencial para uma gestão eficaz de KPIs e para otimizar resultados empresariais (RODRIGUES, 2024).

2.6 Análise de falhas e princípio de Pareto na manutenção

O Diagrama de Pareto é uma ferramenta visual, na forma de gráfico de barras, que organiza e mostra as causas de problemas em ordem decrescente de frequência. Ele foi criado para ajudar equipes a identificar, de maneira rápida, quais são os fatores mais comuns ou impactantes em determinado processo, seguindo a lógica de que uma pequena quantidade de causas responde pela maior parte dos efeitos (BRITO, 2023; MAIA, 2025).

Na análise de falhas, o Diagrama de Pareto serve para evidenciar quais causas devem ser atacadas primeiro e juntamente com uma abordagem estatística é possível identificar, priorizar e mitigar falhas críticas em equipamentos e sistemas de maneira eficiente, gerando maior impacto na redução de paradas e perdas. Ele ajuda equipes a direcionar recursos, tempo e energia para os pontos realmente críticos, reduzindo desperdícios e acelerando resultados sustentáveis no ambiente industrial. Essa abordagem ajuda não só a melhorar a confiabilidade e disponibilidade de equipamentos, mas também a otimizar recursos e reduzir custos associados a falhas (BRITO, 2023; MAIA, 2025).

2.7 Criticidade de ativos

A criticidade refere-se à avaliação das consequências potenciais associadas à perda de funcionalidade de um ativo e à probabilidade de ocorrência de falhas ao longo do tempo. Esse conceito é fundamental para determinar o nível de prioridade nas ações de manutenção, com o

objetivo de garantir a confiabilidade operacional e a qualidade dos serviços. Fatores como o elevado investimento imobilizado e o impacto sistêmico de uma falha são determinantes na avaliação da criticidade de um ativo (GIFALLI, 2025).

2.8 Matriz de criticidade

Matriz de Criticidade é um instrumento de análise que classifica os equipamentos em categorias (Baixa, Média ou Alta Criticidade) com base no impacto potencial de sua falha. Ela, por sua vez, dita a estratégia de manutenção mais indicada, migrando a gestão do PCM (Planejamento e Controle da Manutenção) de uma abordagem reativa para uma preditiva e estratégica. A Matriz de criticidade, juntamente com outras ferramentas de análise de risco e ativos (como a Análise de Criticidade e Risco de Equipamentos e o Algoritmo da Criticidade de Equipamentos), é um pilar da Gestão de Manutenção. O PCM deve utilizar essa matriz para otimizar recursos, concentrar esforços e, acima de tudo, definir a estratégia de manutenção com base na criticidade dos equipamentos. Ao entender e aplicar corretamente a Matriz de Criticidade, as empresas garantem que os ativos mais sensíveis ao negócio recebam o maior investimento em monitoramento e prevenção, reduzindo paradas não programadas e garantindo a segurança operacional (TASS CONSULTING, 2025).

2.9 Custos da manutenção

O custo de manutenção refere-se ao montante total gasto com atividades de manutenção em um determinado período. Isso inclui os custos diretos e indiretos associados à manutenção, como peças de reposição, mão-de-obra, ferramentas, equipamentos, treinamentos, entre outros. Monitorar o custo de manutenção é crucial para a gestão financeira, pois fornece uma perspectiva sobre a eficiência das atividades de manutenção e ajuda a identificar áreas para otimização e controle de custos (TOKEN ENGENHARIA, 2024).

A integração entre indicadores técnicos e econômicos permite decisões mais equilibradas, evitando tanto intervenções excessivas quanto exposição a riscos operacionais elevados. Nesse sentido, a avaliação conjunta de custo, frequência e indisponibilidade, como realizada neste estudo, constitui base sólida para priorização de ações de manutenção.

2.10 Contextualização da usina hidrelétrica

Tecnicamente falando, as usinas hidrelétricas são um conjunto de obras e equipamentos usados para produzir energia a partir do aproveitamento do potencial hidráulico de um rio. Tal potencial, por sua vez, é obtido pela vazão hidráulica e pela concentração dos desníveis existentes ao longo do curso do rio (ENGIE, 2023). A energia potencial gravitacional que se converte em energia cinética é obtida pelo represamento da água. Esse represamento provoca a pressão que converte energia hidráulica em energia mecânica, que é transferida para a turbina onde será convertida em energia elétrica. A energia elétrica produzida é transmitida para uma ou mais linhas de transmissão, interligadas à rede de distribuição (GOUVEIA, 2015)

A confiabilidade dos sistemas hidrelétricos é essencial para garantir estabilidade de geração, segurança operacional e atendimento à demanda energética. Equipamentos como turbinas, geradores, sistemas de excitação, sistemas auxiliares e dispositivos de proteção operam de forma integrada, sendo interdependentes do ponto de vista funcional. Falhas nesses sistemas podem provocar indisponibilidade significativa, elevando custos de manutenção e impactando a geração de energia. Dessa forma, a manutenção em usinas hidrelétricas exige planejamento estruturado, inspeções sistemáticas e priorização baseada em criticidade.

Além disso, o registro do histórico de falhas constitui importante ferramenta para compreensão do comportamento dos ativos ao longo do tempo. A análise desses dados possibilita identificar recorrências, avaliar impacto operacional e orientar decisões de manutenção fundamentadas em evidências técnicas.

Nesse contexto, a gestão da manutenção em ambientes hidrelétricos deve integrar conceitos de confiabilidade, priorização e análise de falhas, visando preservar disponibilidade e eficiência operacional.

2.11 Descrição dos principais sistemas de uma usina hidrelétrica

2.11.1 Sistema de geração – turbina e gerador

Comumente chamamos de máquina o conjunto de equipamentos que conseguem transformar um tipo de energia em outro. O grupo turbina – gerador constitui uma máquina, nesta máquina a turbina transforma energia hidráulica em trabalho mecânico e o gerador transforma o trabalho mecânico em energia elétrica (ELETROBRAS, 2010).

Os turbogeradores são equipamentos com pequeno número de partes móveis (turbina, eixo e rotor elétrico, principalmente). Essas partes móveis não sofrem desgaste acentuado por

não terem contato com superfícies sólidas, exceto os mancais de apoio. Isso faz com que o desgaste desses componentes seja pequeno em condições adequadas de instalação, operação e manutenção. No entanto, o desgaste desses elementos é inevitável devido ao atrito entre a água e as superfícies metálicas, abrasão por sedimentos, cavitação e altas temperaturas no caso do rotor elétrico. Portanto, a manutenção periódica desses elementos é voltada principalmente para: conservação dos mancais; a reposição de material erodido por cavitação/abrasão na superfície da turbina; e a verificação e substituição dos níveis de isolamento do gerador. (NOGUEIRA; ALARCÓN, 2019)

2.11.2 Sistema de excitação e controle

O regulador de velocidade inclui todos os elementos, que respondem diretamente à velocidade e posição ou influenciam a ação de outros elementos do sistema de controle de velocidade. O mecanismo de controle de velocidade inclui equipamentos como relés, servo motores, dispositivos de amplificação de pressão ou de potência, alavancas e conexões entre o regulador de velocidade e as portas/barras acionadas pelo controlador. Por sua vez, o regulador da tensão de excitação deve manter o gerador dentro dos seus limites de capacidade, além de contribuir para o amortecimento das oscilações de baixa frequência no sistema elétrico. O sistema de excitação é importante pois deve estabelecer a tensão interna do gerador síncrono. Em consequência, o sistema de excitação é responsável não somente pela tensão de saída da máquina, mas também pelo fator de potência e pela magnitude da corrente gerada (ALVES, 2018). Estes sistemas procuram estabelecer um equilíbrio entre a geração e a carga, sendo que o regulador de tensão tem a função de estabilizar a tensão de saída da unidade geradora atuando no ajuste de excitação e o regulador de velocidade atua na velocidade da turbina, consequentemente na velocidade do gerador ecoando na frequência dessas máquinas síncronas (SILVA, 2023).

2.11.3 Sistemas auxiliares mecânicos

Os sistemas auxiliares de usinas hidrelétricas (UHE) são componentes fundamentais para garantir o funcionamento seguro, eficiente e contínuo das instalações responsáveis pela geração de energia. Embora não participem diretamente da produção elétrica, esses sistemas dão suporte às operações principais, mantendo as condições ideais de operação das turbinas, comportas, geradores e equipamentos de controle. Eles desempenham papel essencial na operação do empreendimento, atuando em diferentes frentes, como o controle de temperatura,

a lubrificação dos equipamentos e o fornecimento de energia para circuitos de emergência. Eles também são responsáveis por manter a segurança das estruturas hidráulicas, evitando sobrecargas, vazamentos e falhas mecânicas (JONFRA, 2024)

A manutenção dos sistemas auxiliares é indispensável para garantir o funcionamento contínuo e a segurança das operações. A ausência de manutenção preventiva pode gerar falhas em cascata, comprometendo toda a usina. As práticas de manutenção mais comuns incluem: inspeção periódica de equipamentos hidráulicos e elétricos; verificação de vazamentos, pressões e níveis de óleo e água; substituição preventiva de componentes sujeitos a desgaste; limpeza e calibração de sensores e válvulas; atualização de softwares de controle e automação (JONFRA, 2024).

2.11.4 Sistemas elétricos auxiliares, de supervisão e controle e proteção

Segundo SIQUEIRA (2006), basicamente, os equipamentos dos sistema elétricos auxiliares da usina são compostos por painéis CA e CC, transformador de distribuição, grupo gerador diesel, retificador de corrente alternada para contínua e banco de baterias.

Já o sistema de proteção, como o seu próprio nome diz, é responsável por efetuar a proteção da usina e seus equipamentos mediante situações adversas de operação e também oriundas do ambiente externo à usina. A escolha de um sistema de proteção para os equipamentos constituintes de uma usina hidrelétrica envolve aspectos operacionais, econômicos, de segurança física e pessoal, que devem ser analisados caso a caso. O tipo de proteção depende da potência e do tipo de unidade, do diagrama unifilar de geração, do arranjo dos mancais, do tipo de sistema de resfriamento, dos sistemas auxiliares, do sistema de potência onde a usina se interliga, da importância da usina no sistema, das recomendações dos fabricantes, da potência e do tipo de equipamentos envolvidos e de outras particularidades inerentes ao sistema como um todo (RODRIGUES, 2014).

3 METODOLOGIA

3.1 Caracterização dos dados

Os dados empregados nesta pesquisa foram obtidos a partir do histórico de dados do sistema SAP (*Systeme, Anwendungen und Produkte in der Datenverarbeitung*), plataforma corporativa de gestão utilizada para o registro e controle das atividades de manutenção e eventos operacionais. A base extraída, em planilha Excel, continha informações do período de janeiro/2020 a novembro/2025, referentes às Notas de Falha (NF) que são oriundas de ocorrências em equipamentos que falham e, por consequência, causam paradas às unidades de geração de determinada usina hidrelétrica. Nessas notas estão inclusas variáveis técnicas e econômicas associadas às intervenções realizadas, onde foram selecionadas as mais relevantes para o trabalho, entre elas:

- Unidade;
- Sistema;
- Código e Denominação do Equipamento;
- Descrição do problema;
- Texto da causa;
- Data da nota;
- Duração da parada;
- Custos totais reais.

Ao todo foram extraídos registros de 290 documentos de 17 sistemas, sendo eles de unidades geradoras hidráulicas, sistemas auxiliares e linhas de transmissão.

3.2 Tratamento dos dados

Inicialmente, procedeu-se à etapa de pré-processamento dos dados, com o objetivo de assegurar a qualidade, consistência e confiabilidade das informações analisadas. Esse processo compreendeu a identificação e eliminação de registros duplicados, a exclusão de dados inconsistentes ou incompletos, a identificação e complemento de informações faltantes ou incompletas e a padronização das variáveis, garantindo a integridade da base para posterior tratamento estatístico. Tal etapa é fundamental para reduzir vieses analíticos e assegurar que os resultados reflitam com maior fidelidade à realidade operacional estudada.

Os critérios utilizados para a exclusão de dados da base foram os documentos que continham inconsistência e falta de dados de: registro de datas, equipamentos, causa da falha, duração da parada e custos. A Tabela 1 indica os valores de registro da base de dados inicial, os que foram eliminados e o que ficou na base de dados final.

Tabela 1 - Valores de registros da base de dados.

Etapas	Registros
Extração da base de dados do SAP	290
Dados duplicados removidos	36
Dados inconsistentes removidos	19
Base de dados final	235

Fonte: Autoria Própria (2026).

Dentre o conjunto de variáveis disponíveis, foram selecionadas como principais: a identificação do sistema, o código do equipamento, a duração das paradas expressa em horas e os custos totais reais associados às intervenções. A escolha dessas variáveis fundamenta-se na necessidade de avaliar simultaneamente a recorrência das falhas, o impacto operacional decorrente do tempo de indisponibilidade e as implicações econômicas das ocorrências.

Para fins de análise, os sistemas foram tagueados para maior facilidade de identificação durante o estudo, como mostrado na Tabela 2:

Tabela 2 - Tagueamento do sistema.

TAG	Sistema
CSV	COMPORTA SETOR VERTEDOURO
RT	REGULADOR DE TENSÃO
RVE	REGULADOR DE VELOCIDADE ELETRÔNICO
RVH	REGULADOR DE VELOCIDADE HIDRÁULICO
SACF	SERVIÇO AUXILIAR
SCTA	SISTEMA DA COMPORTA DE TOMADA D'ÁGUA
SEB	SUBESTAÇÃO BLINDADA
SGE	SISTEMA DO GERADOR
SPR	SISTEMA DE PROTEÇÃO
STH	SISTEMA DA TURBINA
TRAFO	TRANSFORMADOR
UCD	UNIDADE DIGITAL DE CONTROLE
UGH	UNIDADE GERADORA HIDRÁULICA

Fonte: Autoria Própria.

Com a base de dados devidamente tratada, foram realizadas análises quantitativas por meio de ferramentas estatísticas e gráficas. Destaca-se a aplicação do Diagrama de Pareto, por

meio do MINITAB, como instrumento de priorização, permitindo identificar os equipamentos com maior representatividade em termos de frequência de falhas, impacto no tempo de parada e custos totais.

3.3 Construção da Matriz de Criticidade

A matriz de criticidade foi desenvolvida com o objetivo de classificar e priorizar os sistemas da usina quanto à necessidade de intervenção na manutenção, a partir de uma abordagem multicritério baseada em dados operacionais. Para sua construção, foram considerados três indicadores fundamentais: frequência de falhas, tempo total de parada (em horas) e custo total de manutenção (em reais), representando, respectivamente, a recorrência, o impacto operacional e o impacto econômico das falhas.

Inicialmente, os dados foram consolidados por sistema, permitindo a obtenção dos valores totais de cada critério. Em seguida, foi aplicado um processo de ranqueamento relativo, no qual os sistemas foram ordenados em cada critério de forma decrescente, sendo atribuída a posição 1 ao sistema com maior impacto, posição 2 ao segundo maior, e assim sucessivamente. Esse procedimento permitiu padronizar a comparação entre critérios de naturezas distintas.

A definição da criticidade foi realizada por meio de uma regra lógica estruturada baseada no conceito de destaque relativo entre os sistemas. Especificamente, adotou-se o critério de que sistemas posicionados entre os dois primeiros colocados (Top 2) em pelo menos dois dos três indicadores analisados seriam classificados como de alta criticidade. Essa condição indica que o sistema apresenta impacto relevante sob múltiplas perspectivas, seja operacional, econômica ou de confiabilidade.

Por outro lado, sistemas que aparecem entre os dois primeiros colocados em apenas um dos critérios foram classificados como de criticidade média, indicando relevância pontual, mas não generalizada. Já aqueles que não figuram entre os principais em nenhum dos critérios foram classificados como de baixa criticidade, por apresentarem impacto reduzido no contexto global da manutenção.

A Figura 1 apresenta a matriz de criticidade utilizada para a classificação dos sistemas analisados. A construção da matriz baseia-se na combinação de dois eixos principais: a frequência de falhas e o impacto associado, representado pelo tempo de parada e pelos custos de manutenção.

Figura 1 - Matriz de criticidade dos sistemas baseada na frequência de falhas e impacto operacional/econômico.

		IMPACTO (PARADA/CUSTO)		
		ALTO	MÉDIO	BAIXO
FREQUÊNCIA DE FALHAS	ALTA	ALTA	ALTA	MÉDIA
	MÉDIA	ALTA	MÉDIA	BAIXA
	BAIXA	MÉDIA	BAIXA	BAIXA

Fonte: Autoria Própria.

A representação gráfica facilita a visualização da priorização, permitindo identificar de forma intuitiva de quais sistemas demandam maior atenção na gestão da manutenção. Além disso, a matriz evidencia que a criticidade não está associada exclusivamente à frequência de falhas, mas também ao impacto operacional e econômico de cada ocorrência.

3.4 Justificativa metodológica

A construção do cálculo tradicional da confiabilidade requer, fundamentalmente, o mapeamento do tempo cronológico exato entre as falhas para o cálculo do Tempo Médio entre Falhas (MTBF) e da Taxa de Falha (λ). No entanto, conforme evidenciado na caracterização da base de dados extraída do sistema SAP, a maioria dos ativos apresentou registros de falhas isolados ou baixíssima repetitividade individual ao longo do período de 5 anos. Essa dispersão e ausência de um histórico cronológico contínuo por componente inviabilizam a aplicação de distribuições probabilísticas clássicas (como a Distribuição de Weibull ou Exponencial) para ativos isolados, sob risco de alto viés estatístico.

Diante dessa limitação de dados, a engenharia de manutenção adota indicadores gerenciais e econômicos substitutivos agregados por sistemas funcionais. Para fins de validação e comprovação científica da severidade das falhas nos sistemas analisados, optou-se pela avaliação da confiabilidade operacional por meio de indicadores indiretos baseados em frequência de falhas, indisponibilidade (calculando também o MTTR) e custos (além do cálculo do custo médio por falha).

O Custo Médio por Falha é obtido pela razão entre o custo total real de manutenção corretiva acumulado pelo sistema e o seu número absoluto de falhas:

$$Cm = \frac{\text{Custo Total Real}}{\text{Número de Falhas}} \quad (1)$$

De forma análoga, o Tempo Médio de Reparo (MTTR), que mede a manutenibilidade e a velocidade de resposta da equipe técnica diante da indisponibilidade, é calculado dividindo-se o tempo total de parada em horas pelo número de ocorrências:

$$MTTR = \frac{\textit{Horas Totais de Paradas}}{\textit{Número de Falhas}} \quad (2)$$

A metodologia adotada caracteriza-se, portanto, como quantitativa e descritiva, baseada na análise sistemática de dados históricos operacionais.

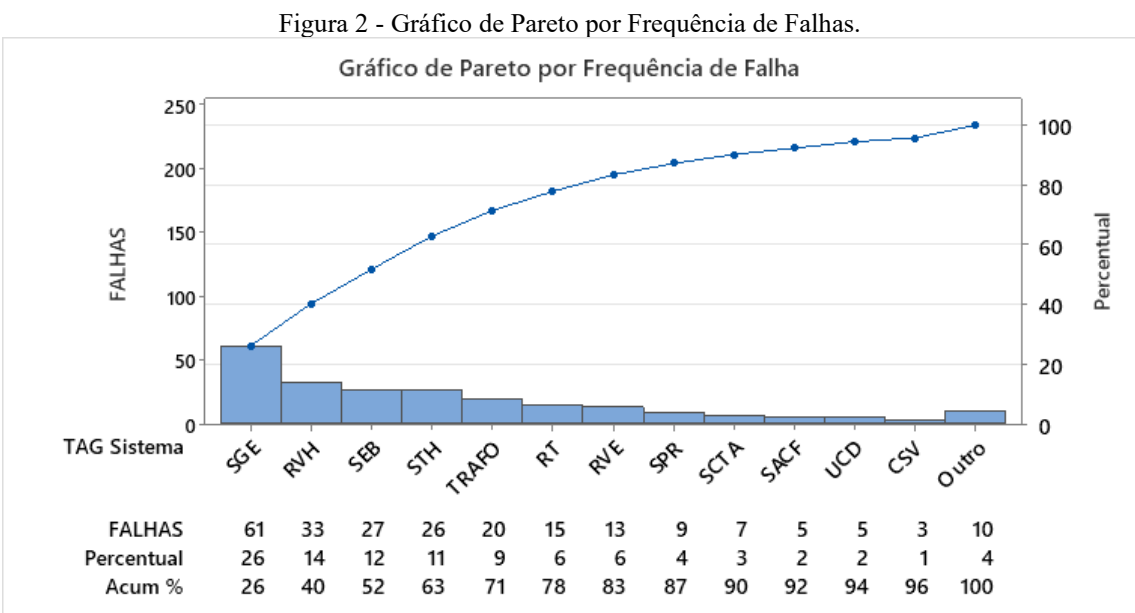
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise inicial da base de dados mostrou que a maioria dos equipamentos apresentava baixa recorrência de falhas quando avaliados individualmente, com predominância de registros únicos. Essa característica dificulta a identificação de padrões consistentes, pois a pouca repetitividade reduz a confiabilidade estatística das comparações e limita a extração de conclusões representativas do comportamento operacional.

Diante dessa limitação, optou-se por realizar a análise em um nível mais agregado, utilizando a variável “Sistema”, que representa o sistema funcional ao qual cada equipamento pertence. Essa estratégia de consolidação de dados por sistemas funcionais para mitigar a baixa repetitividade individual dos equipamentos já foi utilizada na literatura de engenharia de ativos, tendo sido adotada com sucesso em diagnósticos de plantas complexas por Melo (2014) no setor elétrico.

4.1 Análise de Pareto por frequência de falhas

A Figura 2 - Gráfico de Pareto por Frequência de Falhas. Figura 2 apresenta o gráfico de Pareto construído com base na contagem de falhas por Sistema (TAG Sistema). Com isso podemos identificar quais famílias concentram a maior parcela das ocorrências e, portanto, devem ser priorizadas em análises posteriores.



Fonte: Autoria Própria.

Conforme observado, o Sistema do Gerador (SGE) apresentou a maior participação, com 61 ocorrências (26%), seguido por Regulador de Velocidade Hidráulico (RVH) (33 ocorrências – 14%), Subestação Blindada (SEB) (27 ocorrências – 12%) e Sistema da Turbina (STH) (23 ocorrências – 11%). Em conjunto, esses quatro sistemas acumulam aproximadamente 63% das falhas registradas, demonstrando concentração das ocorrências em um número reduzido de categorias. Esse resultado reforça o princípio de Pareto aplicado à manutenção industrial, indicando que intervenções direcionadas às famílias críticas podem gerar ganhos significativos de confiabilidade com esforço otimizado.

Embora a frequência de falhas seja um critério importante para identificação de recorrência, ela não representa, isoladamente, o impacto operacional. Em sistemas industriais, a criticidade real depende também do tempo de parada (indisponibilidade gerada) e do custo de correção associado às intervenções.

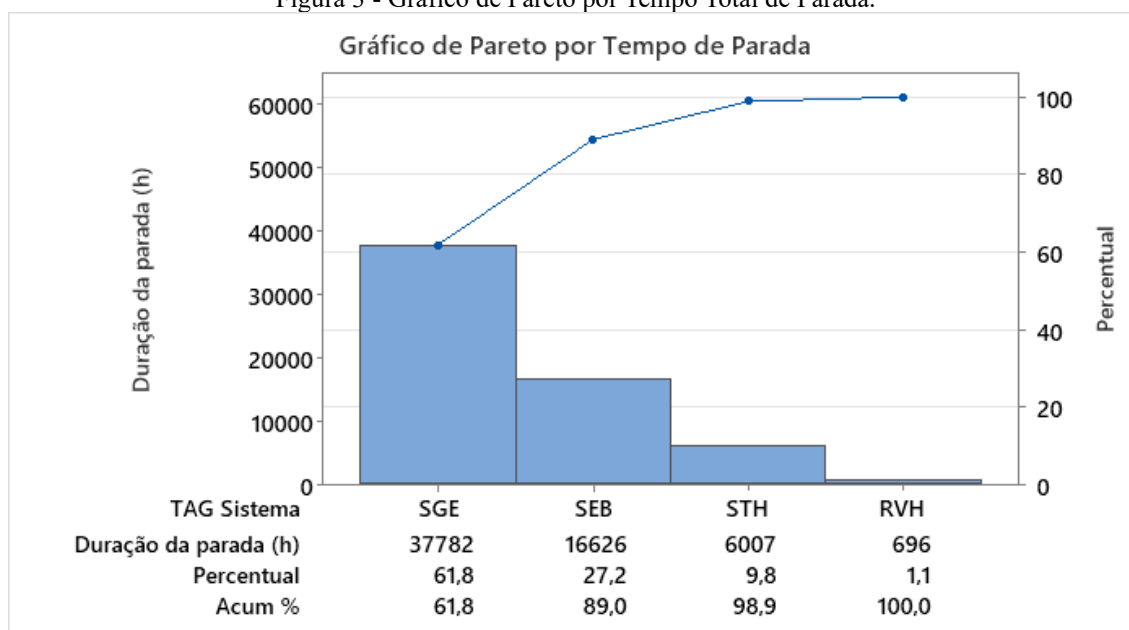
Dessa forma, duas famílias podem apresentar números semelhantes de falhas, porém impactos totalmente diferentes na operação. Assim, além da análise por frequência, torna-se necessário avaliar as famílias críticas também sob o ponto de vista de tempo total de parada em horas e custos totais de manutenção.

4.2 Análise de Pareto por Duração de Parada

Após a agregação dos dados, optou-se por priorizar os quatro sistemas com maior número de falhas, por permitir direcionar a análise para os sistemas com maior representatividade estatística e maior potencial de ganho operacional, evitando a dispersão de esforços em categorias com poucos registros e maior variabilidade. Assim, a discussão e os desdobramentos a seguir concentram-se nos quatro sistemas mais representativos, por serem aquelas que mais contribuem para a recorrência de falhas e, consequentemente, para o direcionamento de ações de melhoria baseadas em evidências.

Por isso, um Pareto complementar (Figura 3) foi construído considerando o tempo total de parada acumulado por sistema, permitindo identificar quais sistemas, além de falharem, causam maior indisponibilidade operacional.

Figura 3 - Gráfico de Pareto por Tempo Total de Parada.



Fonte: Autoria própria.

Ao comparar o Pareto por frequência com o Pareto por tempo total de parada, é possível identificar situações em que um sistema apresenta menor número de falhas, porém maior impacto operacional devido a maiores tempos de reparo.

O sistema SGE concentrou a maior indisponibilidade operacional com aproximadamente 62% do total, seguido por SEB com 27% do total e por STH com 9,8% do total. Apesar de apresentar menor frequência de falhas que RVH, o sistema SEB mostrou impacto operacional elevado devido ao alto tempo de parada. Esse resultado evidencia que falhas menos frequentes podem gerar maior impacto operacional, reforçando a necessidade de priorização baseada em severidade.

Para quantificar o impacto técnico da indisponibilidade e mensurar a manutenibilidade dos sistemas, calculou-se o indicador de Tempo Médio de Reparo (MTTR). O indicador é obtido pela razão entre o tempo total de parada em horas e o número de falhas do período. Sob essa ótica, o sistema SGE apresentou um MTTR de 619,25 horas por falha, enquanto o sistema SEB registrou 630,26 horas por falha durante o período avaliado, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 - MTTR/h do SGE e SEB.

Sistema	Horas Totais de Parada (h)	Número de Falhas	MTTR (h/falha)
SGE	37.774,05	61	619,25
SEB	17.016,91	27	630,25

Fonte: Autoria Própria.

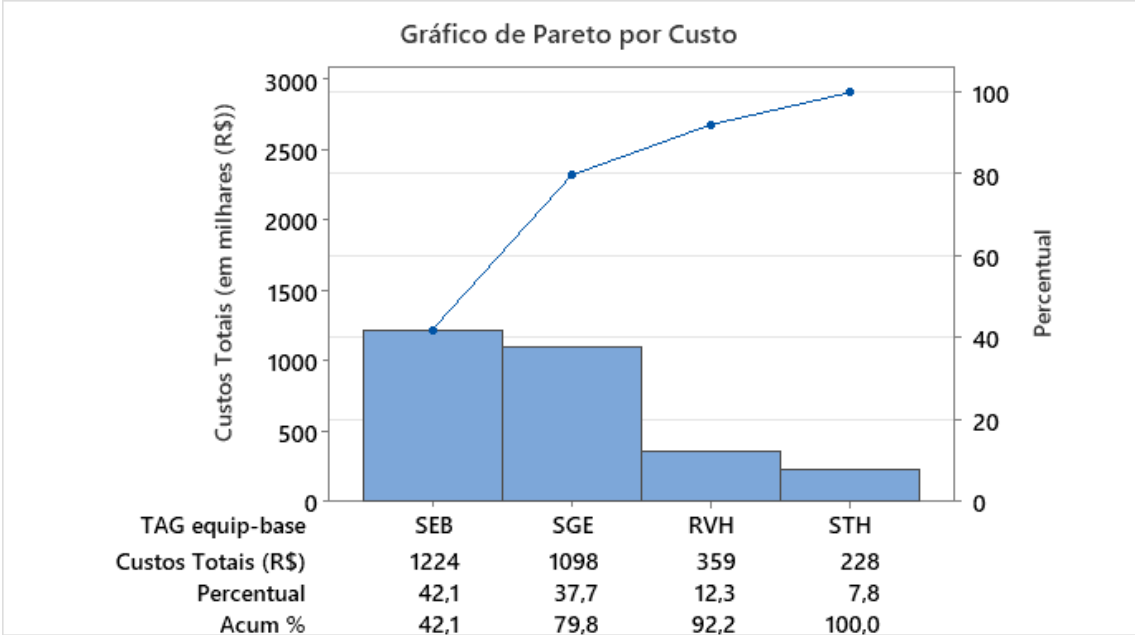
Nota-se que, apesar de o sistema SGE concentrar a maior indisponibilidade operacional, o SEB possui uma ligeira vantagem no tempo médio por reparo, mostrando que ambos os sistemas operam em patamares alarmantes de indisponibilidade por falha. Isso demonstra que qualquer evento de falha nesses sistemas resulta em paradas prolongadas da unidade geradora, reforçando a urgência da transição para estratégias preditivas.

4.3 Análise de Pareto por Custos

Além do impacto operacional, o custo associado às falhas é um critério essencial para definição de criticidade. A partir disso, foi consolidado os custos reais de manutenção por sistema, por meio da soma do campo “Custos totais reais”, obtendo o custo total associado às intervenções corretivas.

A análise de custos permite identificar famílias com alto impacto financeiro, inclusive aquelas que podem não liderar em frequência, mas apresentam correções mais complexas e dispendiosas.

Figura 4 - Gráfico de Pareto por Custos.



Fonte: Autoria Própria.

A Figura 4 nos mostra que o sistema SEB com 42% do total de custos, supera levemente o sistema SGE, com 37% do total, seguido por RVH com 12% e STH com quase 8% do total.

De forma a evidenciar e validar a severidade financeira das ocorrências, calculou-se o custo médio por falha para os dois principais sistemas críticos (SGE e SEB), conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Custo médio por falha SGE e SEB.

Sistema	Custo Total (R\$)	Número de Falhas	Custo Médio por Falha (R\$)
SGE	1.098.012,60	61	18.000,21
SEB	1.223.729,43	27	45.323,31

Fonte: Autoria Própria.

Embora o sistema SGE detenha o maior número absoluto de registros (61 falhas), o seu custo médio por intervenção é de aproximadamente R\$ 18 mil. Entretanto, o sistema SEB, com apenas 27 falhas, apresenta um custo médio por falha de R\$ 45,3 mil (valor 2,5 vezes superior ao do SGE). Esse indicador numérico revela que SEB apresenta o maior impacto financeiro, mesmo com menor frequência relativa. Isso mostra que o custo médio elevado indica intervenções corretivas de mais complexas e substituição de componentes de maior valor agregado.

4.4 Matriz de Criticidade

Com base nos três critérios (frequência, parada total e custo) foi construída uma matriz de criticidade classificando os sistemas em Alta, Média ou Baixa prioridade (sendo o Rank F referente a falhas, o Rank P referente a parada e Rank C referente ao custo), permitindo direcionar ações de melhoria de forma objetiva.

Tabela 5 - Matriz de Criticidade dos Sistemas

Sistema	Falhas	Parada (h)	Custo (R\$)	Rank F	Rank P	Rank C	Criticidade
SGE	61	37.782	1.098.012,60	1	1	2	Alta
SEB	27	16.626	1.223.729,43	3	2	1	Alta
RVH	33	6.007	358.682,99	2	3	3	Média
STH	26	696	228.234,69	4	4	4	Baixa

Fonte: Autoria Própria.

A Tabela 5 evidencia que o sistema SGE foi classificado como Alta criticidade por apresentar simultaneamente alta frequência e alto impacto operacional. O sistema SEB também foi classificado como Alta criticidade, devido ao elevado custo e tempo de parada. RVH foi considerado Média criticidade, enquanto STH foi classificado como Baixa criticidade.

A divergência entre o volume da frequência de falhas e o impacto operacional (parada e custo), vista na relação entre os sistemas SGE e SEB, é validada com os achados de estudos multicritérios industriais de autores como Ida (2021), que provam que falhas com altos custos unitários exigem matrizes de criticidade apartadas da frequência absoluta.

4.5 Análise dos sistemas críticos

Com base nas análises feitas, os sistemas mais críticos (SGE e SEB) foram selecionados para realizar uma análise mais interna, por apresentar maior representatividade.

4.5.1 Equipamentos repetidores

A análise individual dos registros de falha do sistema SGE evidenciou a presença de equipamentos com ocorrências repetidas ao longo do período analisado. Esse comportamento caracteriza falhas crônicas, nas quais o mesmo ativo retorna ao estado de falha após intervenções corretivas.

A repetição de falhas em equipamentos específicos podem ser indicações de correções paliativas ou incompletas, desgaste acelerado de componentes, possível inadequação do plano preventivo e problemas de instalação ou ajuste.

Do ponto de vista operacional, equipamentos repetidores aumentam a frequência de intervenções não planejadas, elevando custos indiretos, mobilização de mão de obra e indisponibilidade acumulada. Mesmo quando o custo unitário da falha não é elevado, o impacto recorrente compromete a confiabilidade do sistema. A Tabela 6 apresenta os equipamentos da família SGE que registraram falhas repetidas.

Tabela 6 - Equipamentos repetidores do sistema SGE.

Equipamento	Denominação	Unidade	Quantidade
12405980	Rotor	UGH04	5
12399344	Estator	UGH01	5
12408341	Estator	UGH15	5
12344428	Estator	UGH03	2
12406955	Estator	UGH07	2
12344781	Mancal Guia do Gerador	UGH07	2
12408383	Rotor	UGH20	2
12408386	Estator	UGH20	2

Fonte: Autoria Própria.

A análise de repetibilidade revelou uma considerável concentração de problemas crônicos no sistema SGE. Dos 8 equipamentos mapeados na Tabela 6, destacam-se o Rotor da UGH04, o Estator da UGH01 e o Estator da UGH15, cada um apresentando isoladamente 5 falhas ao longo do período analisado. Em termos globais, estes 8 equipamentos repetidores foram responsáveis por um total de 23 falhas. Considerando que o sistema SGE registrou 61 falhas no total, conclui-se que apenas 8 ativos respondem por 37,7% de todas as falhas do sistema.

Já o sistema SEB, embora apresente menor frequência total de falhas, a análise individual revelou equipamentos com reincidência de ocorrências. Diferentemente do padrão observado em SGE, as falhas repetidas em SEB tendem a estar associadas a eventos de maior severidade técnica.

A repetição de falhas nesse contexto indica risco elevado, pois cada ocorrência envolve maior tempo de reparo e custo de intervenção. Assim, equipamentos repetidores do sistema SEB representam ativos de criticidade ampliada.

Esse perfil indica falhas de maior complexidade técnica, que frequentemente podem envolver componentes de alto valor agregado, desmontagens extensas, necessidade de ajustes finos ou uma maior dependência de recursos especializados. A Tabela 7 apresenta os equipamentos do sistema SEB com falhas repetidas.

Tabela 7 - Equipamentos repetidores do sistema SEB.

Equipamento	Denominação	UGH	Quantidade
12346085	DISJUNTOR 500 KV	UGH22	4
12344677	DISJUNTOR 500 KV	UGH06	2
12344765	DISJUNTOR 500 KV	UGH07	2
12345117	DISJUNTOR 500 KV	UGH11	2
12345381	DISJUNTOR 500 KV	UGH07	2

Fonte: Autoria Própria.

Da mesma forma que o observado na análise do sistema SGE, a avaliação da SEB permitiu identificar os ativos que apresentam falhas crônicas e recorrentes. A análise dos dados apontou que 5 equipamentos concentraram 12 ocorrências. Considerando que o sistema SEB registrou um total de 27 falhas no período, este grupo de ativos é responsável por 44% do total de indisponibilidades do sistema.

Diferentemente da SGE, onde o impacto decorre da recorrência, a criticidade da SEB está associada à magnitude de cada falha. Nesse sistema a recorrência deve ser tratada com prioridade, pois combina repetição de eventos com alta severidade operacional. A redução da reincidência nesses equipamentos tende a gerar impacto direto na diminuição do custo de manutenção e do tempo de indisponibilidade.

4.6 Relação entre falha e custo

A presença de equipamentos repetidores no sistema SGE demonstra que parte significativa das falhas está concentrada em ativos específicos. Esse comportamento amplia o custo indireto da manutenção devido a:

- mobilização frequente de recursos;
- interrupções operacionais sucessivas;
- desgaste prematuro de componentes associados.

Ainda que o custo unitário seja moderado, o efeito acumulado das intervenções gera impacto operacional relevante.

No caso da SEB, a repetição é menos frequente, porém cada ocorrência representa evento de alto custo. Assim, a gestão deve priorizar tanto a eliminação de falhas crônicas quanto a mitigação de falhas severas.

A análise econômica revelou que o custo médio por falha do sistema SEB é superior ao das demais famílias avaliadas. Esse indicador sugere que cada ocorrência demanda maior volume de recursos, tanto em termos de materiais quanto de mão de obra especializada.

Esse comportamento pode estar associado a:

- intervenções em componentes de alto valor agregado;
- necessidade de desmontagens complexas;
- maior tempo de diagnóstico;
- dependência de recursos externos ou peças sobressalentes específicas;
- impacto indireto na produção devido à indisponibilidade prolongada.

Do ponto de vista gerencial, falhas com alto custo unitário representam risco econômico elevado, pois uma única ocorrência pode comprometer significativamente o

orçamento de manutenção. Assim, o sistema SEB se caracteriza como crítica sob a perspectiva financeira, exigindo ações preventivas direcionadas.

4.7 Melhorias Propostas

As análises realizadas no capítulo anterior evidenciaram que a criticidade operacional dos sistemas avaliados decorre de diferentes mecanismos, envolvendo tanto a recorrência de falhas quanto a severidade de seus impactos operacionais e econômicos. A identificação dos sistemas SGE e SEB como prioritários demonstrou que a gestão da manutenção deve considerar abordagens específicas para cada padrão de falha observado.

A presença de equipamentos repetidores, a concentração de indisponibilidade operacional e o elevado custo de determinadas intervenções indicam oportunidades claras de melhoria na estratégia de manutenção. Esses resultados reforçam a importância da priorização baseada em dados, permitindo direcionar esforços técnicos e recursos de forma mais eficiente.

Nesse contexto, as propostas apresentadas nesta seção buscam alinhar as práticas de manutenção às características operacionais identificadas, com foco na redução de falhas recorrentes, mitigação de eventos severos e aumento da confiabilidade dos sistemas. As melhorias são fundamentadas na análise multicritério realizada, contemplando ações preventivas, preditivas e de gestão de informações.

Dessa forma, as recomendações a seguir não apenas respondem aos padrões de criticidade observados, mas também contribuem para a construção de um processo de manutenção mais estruturado, orientado por desempenho e sustentado por evidências técnicas.

4.7.1 Melhoria na qualidade dos registros de manutenção

A confiabilidade das análises depende diretamente da qualidade dos dados registrados. Recomenda-se padronização do preenchimento das informações de falha, incluindo identificação do equipamento, melhor descrição do evento, causa provável e ação executada.

A melhoria do registro contribui para análises futuras mais precisas, possibilitando tomada de decisão baseada em evidências.

4.7.2 Melhorias direcionadas ao sistema SGE

O sistema SGE apresentou elevada recorrência de falhas e presença de equipamentos repetidores, indicando comportamento crônico que compromete a disponibilidade operacional. Esse cenário sugere necessidade de revisão da abordagem de manutenção aplicada aos ativos desse sistema.

Dado que os maiores problemas se concentram no Estator, Rotor e Mancais, sugere-se a inclusão técnica das seguintes ações:

- **Análise de Vibração:** Implementação de sensores permanentes de vibração nos mancais guia do gerador e estator para identificar desalinhamentos, desbalanceamentos magnéticos ou mecânicos antes que gerem desgaste severo ou falha catastrófica.
- **Monitoramento Contínuo de Temperatura:** Acompanhamento térmico através de sensores PT100 embutidos nas ranhuras do estator e nas sapatas dos mancais, permitindo identificar sobrecargas térmicas ou falhas no sistema de água de resfriamento.
- **Ensaio de Descargas Parciais (DP):** Adoção de monitoramento de descargas parciais no estator das unidades geradoras, técnica preditiva essencial para avaliar a degradação do sistema de isolamento de alta tensão do gerador sem a necessidade de paradas não programadas.
- **Monitoramento dos Mancais:** Implementação de um sistema contínuo de monitoramento da espessura do filme de óleo e da pressão hidrodinâmica nos mancais de guia e de escora das UGHs. É uma técnica preditiva que permite detectar anomalias no regime de lubrificação, desalinhamentos severos do eixo vertical e excentricidades antes que ocorra o contato metal-metal entre o eixo e as casquilhas/sapatas do mancal.

4.7.3 Melhorias direcionadas ao sistema SEB

Embora o sistema SEB apresente menor frequência de falhas, seu impacto econômico e operacional é elevado, devido ao alto tempo médio de reparo e custo por intervenção. Dessa forma, as melhorias devem priorizar a mitigação de eventos severos.

Como o foco do SEB são falhas severas e dispendiosas (geralmente ligadas a disjuntores, seccionadoras e barramentos isolados), sugere-se:

- Termografia Infravermelha Periódica: Inspeção visual térmica de todas as conexões, muflas e pontos de contato elétrico expostos para detecção precoce de pontos quentes resultantes de mau contato ou oxidação.
- Monitoramento de Pressão e Densidade do Gás SF6: Implementação de sistemas automatizados de alarme para vazamento de gás hexafluoreto de enxofre (SF6), que atua como meio isolante e de extinção de arco nos disjuntores da subestação.
- Ensaios de Resistência de Contato e Tempo de Operação: Programação de testes dinâmicos preventivos nos disjuntores para avaliar o desgaste dos contatos internos e garantir que os tempos de abertura e fechamento estejam estritamente dentro do recomendado pelo fabricante, mitigando falhas catastróficas de proteção.
- Análise de operação dos disjuntores: Adoção de ensaios preditivos periódicos de oscilografia e análise de tempos de abertura, fechamento e simultaneidade dos contatos dos disjuntores da subestação. Esta técnica monitora o comportamento dinâmico dos mecanismos de acionamento.

Outro ponto importante é o planejamento de sobressalentes estratégicos, reduzindo o tempo de indisponibilidade associado à espera por peças ou recursos. A padronização de procedimentos de intervenção e capacitação técnica da equipe também contribuem para redução do MTTR.

Essas ações visam minimizar o impacto de cada falha, preservando disponibilidade operacional e controle de custos.

4.7.4 Estratégia integrada de manutenção

Embora existam práticas de inspeção em operação, como coleta de óleo (isolante e lubrificante) e análise de termovisão, recomenda-se ampliar a utilização de monitoramento de condição para equipamentos com histórico de falha recorrente ou alto impacto operacional. As ações sugeridas incluem:

- monitoramento direcionado de parâmetros críticos;
- inspeções baseadas em tendência;
- correlação entre sinais de degradação e intervenções preventivas.

O fortalecimento da preditiva contribui para antecipação de falhas e redução de intervenções emergenciais.

4.7.5 Implantação de estrutura formal de análise de causa raiz

A análise dos registros indica ausência de metodologia padronizada para investigação das falhas recorrentes, onde muitas das causas das falhas são dadas apenas como “causa não identificada”. Isso dificulta o aprendizado organizacional e a eliminação de causas sistêmicas.

Propõe-se a implantação de um processo estruturado de análise de causa raiz, contemplando:

- registro padronizado de falhas;
- identificação de causa técnica e operacional;
- documentação das ações corretivas;
- acompanhamento da eficácia das soluções.

Ferramentas como diagramas de causa e efeito ou análises sistemáticas de falha podem ser incorporadas ao fluxo de manutenção, favorecendo intervenções definitivas.

5 CONCLUSÃO

Diante do cenário analisado, podemos ver que os resultados obtidos permitiram atingir plenamente o objetivo geral proposto para este estudo. A avaliação da confiabilidade operacional dos ativos da usina foi consolidada com sucesso por meio da análise quantitativa de falhas, de indisponibilidade (MTTR) e impacto financeiro. A aplicação sistemática do Princípio de Pareto e da Matriz de Criticidade se mostrou eficaz não apenas para isolar e identificar os sistemas de maior criticidade, mas também para estabelecer diretrizes estratégicas e fundamentadas de engenharia voltadas ao aprimoramento da gestão de manutenção da planta.

A pesquisa evidenciou que a utilização de dados históricos extraídos do sistema SAP é um recurso fundamental para uma gestão de ativos precisa. A análise estatística permitiu comprovar que, embora o Sistema do Gerador (SGE) apresente maior frequência de falhas, a Subestação Blindada (SEB) impõe riscos financeiros severamente mais elevados por ocorrência. Além disso, o mapeamento de repetibilidade isolou os equipamentos que atuam como gargalos crônicos na planta, validando a necessidade urgente de evolução das práticas de manutenção.

Em suma, a transição de uma cultura puramente corretiva para estratégias preditivas direcionadas, baseadas em técnicas como análise de vibração, monitoramento de mancais, termografia e análise de disjuntores, apresenta-se como a solução viável para mitigar falhas catastróficas.

REFERÊNCIAS

- ALVES, Kariston Dias. **Estratégias de controle para turbinas hidrelétricas**. Brasil. *In*: Embarcados, 24 jan. 2018. Disponível em:< [Turbinas Hidrelétricas: Estratégias de controle - Embarcados](#)>
- BRITO, Jossian. **O princípio de pareto e a identificação das falhas críticas**. Ubajara, CE, 17 jun. 2023. LinkedIn: Jossian B. Disponível em:< <https://www.linkedin.com/pulse/o-princ%C3%ADpio-de-pareto-e-identifica%C3%A7%C3%A3o-das-falhas-cr%C3%ADticas-brito/>>
- ELETOBRAS. **Equipamentos do grupo turbina-gerador e auxiliares do grupo**. Tucuruí, 1982.
- ENGIE. Saiba tudo sobre usinas hidrelétricas, fundamentais para a transição energética. Brasil. *In*: Engie Além da Energia. 20 mar. 2023. Disponível em:< <https://www.alem-da-energia.engie.com.br/tudo-sobre-usinas-hidreletricas/>>
- FOGLIATTO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luis Duarte. **Confiabilidade e manutenção industrial**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.
- GIFALLI, André. **Uma nova metodologia de criticidade para gestão e priorização de transformadores de potência a partir de método multicritério e análise multivariada**. 2025. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2025.
- GOUVEIA, Rosimar. Usina hidrelétrica. Rio de Janeiro. *In*: Toda Matéria. 2015. Disponível em:< <https://www.todamateria.com.br/usina-hidreletrica/>>
- IDA, Gabriel T. **Aplicação da metodologia FMECA baseada na Manutenção Centrada na Confiabilidade em uma indústria farmacêutica**. 2021. 52 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2021.
- JONFRA. **Sistemas auxiliares de usinas hidrelétricas (UHE)**. São Paulo, SP. *In*: Jonfra. 2024. Disponível em:< <https://www.jonfra.com.br/sistemas-auxiliares-de-usinas-hidreletricas-uhe>>
- KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção: Função estratégica**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Qualitmark, 2009.
- MAIA, Renan. **Diagrama de pareto: como usar na análise de falhas**. Brasil. *In*: Blog Prelix, 23 dez. 2025. Disponível em:< <https://blog.prelux.com.br/post/diagrama-de-pareto-analise-de-falhas>>
- MELO, Lindomar Santana de. **Método para gestão do setor de manutenção de uma usina hidroelétrica**. 2014. 74 páginas. Dissertação (Mestrado Profissional em Sistemas de Energia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2014,

MOUBRAY, John. **Reliability-centred maintenance**. Edição Brasileira. Lutterworth: Aladon Ltd. 2000.

NOGUEIRA, Manoel Fernandes Martins; ALARCÓN, Arturo. **Impacto das interrupções na geração hidrelétrica do Brasil**. Nota técnica do BID – 1595. 2019.

OLIVEIRA, João Antônio de; VIANA, Hebert Ricardo Garcia. Indicadores de manutenção: uma investigação na literatura. **Revista Foco: Interdisciplinary Studies**. Belém, v. 17, n. 12, p. 1-22, nov. 2024.

RODRIGUES, Samuel. **Gestão de indicadores com foco na qualidade dos dados: otimizando resultados empresariais**. Araxá, MG, 16 dez. 2024. LinkedIn: Samuel Rodrigues. Disponível em:< <https://www.linkedin.com/pulse/gest%C3%A3o-de-indicadores-com-foco-na-qualidade-dos-dados-rodrigues-asjgf/>>

SILVA, Sílvio Luis de Melo. **Regulação de tensão e velocidade**. Belo Horizonte, MG, 2023. LinkedIn: Snef Brasil. Disponível em:< [\(1\) Snef Brasil: visão geral | LinkedIn](#)>

SIQUEIRA, Ricardo Barbosa Posch. **Construção de diagramas de custos para PCH incorporando turbinas de mercado**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2006.

TASS CONSULTING. **A matriz de criticidade na gestão de ativos: como priorizar investimentos e evitar falhas**. Curitiba, PR, 26 nov. 2025. LinkedIn: Tass Consulting. Disponível em:< <https://www.linkedin.com/pulse/matriz-de-criticidade-na-gest%C3%A3o-ativos-como-priorizar-investimentos-iwcif/>>

TOKEN ENGENHARIA. **Indicadores de manutenção, o que é, como calcular e utilizar**. Volta Redonda, RJ. In: Token Engenharia. 2024. Disponível em:< <https://tokenengenharia.com.br/indicadores-de-manutencao-o-que-e-como-calcular-e-utilizar/>>

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ. **Guia de Elaboração de Trabalhos acadêmicos**. Belém. UFPA, 2025. Disponível em: < <https://drive.google.com/file/d/1sSyIcG7d7fpDuzIQE6L4BXRiBQwwh-9p/view>>

XENOS, Halilaus Georgius D'Philipos. **Gerenciando a manutenção produtiva**. 2ª ed. Belo Horizonte: Falconi, 1998