

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

VINICIUS MARTINS DIAS TONI

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA ESPECIALISTA (*SMART SYSTEM*) PARA
AUTOMATIZAR A CONSTRUÇÃO DE PLANOS DE MANUTENÇÃO: APLICAÇÃO
NO SETOR HIDRELÉTRICO**

GUARAPUAVA

2024

VINICIUS MARTINS DIAS TONI

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA ESPECIALISTA (*SMART SYSTEM*) PARA
AUTOMATIZAR A CONSTRUÇÃO DE PLANOS DE MANUTENÇÃO: APLICAÇÃO
NO SETOR HIDRELÉTRICO**

**Development of a Smart System to Automate the Construction of Maintenance
Plans: A Case Study in the Hydroelectric Sector**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): Prof. Dra. Marjorie Maria Bellinello

GUARAPUAVA

2024



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

VINICIUS MARTINS DIAS TONI

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA ESPECIALISTA (*SMART SYSTEM*) PARA
AUTOMATIZAR A CONSTRUÇÃO DE PLANOS DE MANUTENÇÃO: APLICAÇÃO
NO SETOR HIDRELÉTRICO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 18/03/2024

Professor Dr. Carlos Bernardo Gouvêa Pereira
Doutor em engenharia mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Raphael Augusto de S Benedito
Doutor em Ciências – Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Renan Favarão da Silva
Doutor em Engenharia Mecânica
Universidade de São Paulo

GUARAPUAVA

2024

Dedico este trabalho à minha orientadora, Prof^a. Dra.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a toda a experiência acadêmica proporcionada pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná e seus docentes a mim, pois tudo que conquistei academicamente e profissionalmente foi devido a esta excelente faculdade e o magnífico curso de bacharelado em engenharia mecânica.

Posteriormente, gostaria de agradecer a Prof^a. Dra. Marjorie Belinello, pela paciência, ensinamentos e a oportunidade que me forneceu de participar de projetos de iniciação científica e grupos de pesquisas como bolsista.

Aos meus familiares pelo apoio e ajuda nos momentos que mais precisei e aos meus amigos membros do Chicago, pela receptividade de sempre, mesmo que distante.

À minha futura esposa, Ana Laura Gonçalves Chicarelli, pela compreensão e motivação dia após dia, até e depois da conclusão deste trabalho.

Por fim, gostaria de agradecer também dois ilustres professores, Elmesson Jesus Alexandre e Carlos Roberto Toloí, que me prepararam para a escola da vida.

RESUMO

Este trabalho investiga a criação de um algoritmo para a concepção de um sistema especialista de suporte à manutenção em unidades geradoras de energia. Incorporando as premissas da Indústria 4.0, o estudo propõe uma abordagem integrada que combina técnicas avançadas de Processamento de Linguagem Natural (PLN) e Inteligência Artificial (IA) para analisar textos de Ordens de Serviço (OS). O objetivo é elaborar um plano de manutenção proativo e inteligente, otimizando os processos e contribuindo para a manutenção preditiva da unidade. Utilizando dados obtidos da Ferramenta de Análise e Criticidade de Modos e Efeitos de Falhas (FMECA), o algoritmo desenvolvido busca estabelecer correlações entre as OS e identificar padrões de falhas e componentes críticos mencionados. A pesquisa emprega uma metodologia híbrida, unindo análise quantitativa, através de métricas e dados numéricos, com análise qualitativa, com o intuito de extrair informações valiosas das narrativas textuais encontradas em 112 registros de manutenção. Para o processamento eficaz dos textos, o estudo aplica técnicas de tokenização, isolando cada palavra nos registros de OS para uma análise mais granular. Este passo é seguido pela filtragem de palavras de parada e pontuações, elementos que não contribuem significativamente para a análise. Subsequentemente, as palavras residuais são lematizadas, consolidando os verbos no infinitivo e masculino singular para substantivos e adjetivos. O tratamento dos dados textuais precede a aplicação de métodos de IA, especificamente a técnica de TF-IDF e a análise de similaridade de cosseno, para determinar a proximidade semântica entre os termos. A implementação do algoritmo, realizada em Python e com armazenamento de dados via SQL, culmina em um plano de manutenção eficaz e econômico. Os resultados apontam para a necessidade de ações de manutenção focadas prioritariamente nos modos de falha identificados como "Queima", "Rompimento" e "Mau contato", e nos componentes críticos como o 'Trocador de Calor', 'Detector de água no óleo' e 'Tubulação de água'.

Palavras-chave: Indústria 4.0; Smart System; Planos de Manutenção; Processamento de Linguagem Natural; Inteligência Artificial.

ABSTRACT

This study investigates the creation of an algorithm for the design of an expert system to support maintenance in power generation units. Incorporating the premises of Industry 4.0, the study proposes an integrated approach that combines advanced techniques of Natural Language Processing (NLP) and Artificial Intelligence (AI) to analyze Service Order (SO) texts. The goal is to develop a proactive and intelligent maintenance plan, optimizing processes and contributing to the unit's predictive maintenance. Using data obtained from the Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis (FMECA) tool, the developed algorithm seeks to establish correlations between the SOs and identify patterns of failures and critical components mentioned. The research employs a hybrid methodology, merging quantitative analysis through metrics and numerical data with qualitative analysis, aiming to extract valuable information from the textual narratives found in 112 maintenance records. For effective text processing, the study applies tokenization techniques, isolating each word in the SO records for a more granular analysis. This step is followed by filtering out stop words and punctuation, elements that do not contribute significantly to the analysis. Subsequently, the residual words are lemmatized, consolidating verbs into their infinitive form and nouns and adjectives into the masculine singular. The processing of textual data precedes the application of AI methods, specifically the TF-IDF technique and cosine similarity analysis, to determine the semantic proximity between terms. The algorithm implementation, carried out in Python with data storage via SQL, culminates in an efficient and cost-effective maintenance plan. The results indicate the need for maintenance actions focused primarily on failure modes identified as "Burnout", "Breakage", and "Poor contact", and on critical components such as the 'Heat Exchanger', 'Oil Water Detector' and 'Water Piping'.

Keywords: Industry 4.0; Smart System; Maintenance Plans; Natural Language Processing; Artificial Intelligence.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Exemplo de layout da planilha FMEA/FMECA	21
Figura 2	Representação de uma usina hidrelétrica típica	30
Figura 3	Turbina hidráulica tipo Francis	32
Figura 4	Transformador elevador trifásico de potência	33
Figura 5	Sistema de resfriamento do tipo radiador e ventilador	34
Figura 6	Parte ativa do transformador	35
Figura 7	Arquitetura do sistema especialista	38
Figura 8	Subsistemas do transformador de potência	44
Figura 9	Recorte do FMECA do sistema de resfriamento do TRAFO	51
Figura 10	Criação da tabela “arvore_funcional” no MySQL	52
Figura 11	Relacionamento entre tabelas do banco de dados	53
Figura 12	Tabela “Plano” no MySQL e seu resultado vazio	54
Figura 13	Código usado para conexão do Jupyter Notebook com o MySQL	55
Figura 14	Mensagem de confirmação para conexão com o banco de dados	55
Figura 15	Importação das bibliotecas usadas para tratamento dos dados	56
Figura 16	Função processar_descricao com aplicação de PLN das descrições da OS	56
Figura 17	Lista com os resultados com a primeira frase tokenizada	57
Figura 18	Lista de palavras sem stop words	57
Figura 19	Resultado com a lista de frases após lematização	57
Figura 20	Código para cálculo da matriz tf-idf e similaridade do cosseno	59
Figura 21	Resultado do algoritmo após a criação da matriz TF-IDF dos componentes	60
Figura 22	Resultado do algoritmo após a etapa de similaridade por cosseno dos componentes	61
Figura 23	Criação da tabela com descrição da OS, componente e modo de falha correlacionado	64
Figura 24	Nuvem de palavras para os modos de falhas presentes na tabela resultado	65
Figura 25	Criação da tabela com descrição da OS, componente e modo de falha correlacionado	66

Figura 26	Gráfico de Pareto com a frequência de modo de falha	69
Figura 27	Gráfico de Pareto com a frequência de componentes	70

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Estudos correlatos	40
Quadro 2	Descrição funcional dos componentes do TRAFO 525Kv	45
Quadro 3	Modelos de Modos de Falhas identificados na Tratativa de falhas do TRAFO 525Kv	46
Quadro 4	Tabela de OS com representações de algumas descrições de OS	48
Quadro 5	Recorte da tabela xls criada a partir do tratamento de PLN e similaridade	50
Quadro 6	Estrutura do banco de dados (em xls) gerada pelo tratamento de PLN e Similaridade	62
Quadro 7	Tarefas do Plano de Manutenção gerado pelo cruzamento de Database automatizado pelo sistema especialista desenvolvido	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IoT	Internet das Coisas
CPS	Sistemas Ciber-Físicos
UHE	Usinas hidrelétricas
UG's	Unidades geradoras
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
PLN	Processamento de Linguagem Natural
FMECA	Análise dos Modos de Falha, Efeitos e Criticalidade
IA	Inteligência artificial
TF-IDF	Termo–inverso da frequência nos documentos
SGDB	Sistema de gerenciamento de banco de dados
NPR	Número de prioridade de risco
OS	Ordem de Serviço

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
1.1	Problema de Pesquisa	14
1.2	Tema	155
1.3	Justificativa	155
1.4	Objetivos	166
1.4.1	Objetivo Geral	166
1.4.2	Objetivos Específicos	176
2.	REVISÃO DE LITERATURA	188
2.1	Fundamentos da gestão da manutenção	188
2.2	Planejamento e controle de manutenção (PCM)	19
2.2.1	Análise de Criticidade e Modos de Falhas (FMECA)	20
2.2.2	Plano de manutenção	21
2.3	A manutenção na Indústria 4.0	22
2.4	Sistemas especialistas aplicados na gestão industrial	24
2.4.1	Processamento de linguagem natural (PLN) aplicado na construção de sistemas especialistas	25
2.4.2	Técnicas de aplicação de inteligência artificial em dados textuais	27
2.5	Usinas Hidrelétricas	30
2.5.1	Turbinas Hidráulicas	31
2.5.2	Transformadores elevadores de potência	33
3.	METODOLOGIA DE PESQUISA	37
3.1	Classificação da metodologia	37
3.2	Arquitetura do sistema especialista	37
4.	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA ESPECIALISTA E APLICAÇÃO EM SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA	43
4.1	Estrutura do sistema do TRAFÓ 525KV	43
4.2	Estruturação do banco de dados – FMECA	46
4.3	Tratamento de dados com processamento de linguagem natural	54
4.4	Estabelecendo a correspondência e similaridade com IA	57
4.5	Constituição do plano de manutenção 60	61
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
6.	CONCLUSÕES	72
6.1	Recomendação para trabalhos futuros	73
	REFERÊNCIAS	74
	APÊNDICE A - Artigo publicado durante o ciclo IC UTFPR (2021-2022) relacionado ao desenvolvimento da pesquisa do referido TCC	79
	ANEXO A – DATABASE ORDEM DE SERVIÇO	90
	ANEXO B – RESULTADO DO PLANO GERADO PELA APLICAÇÃO	108

1 INTRODUÇÃO

O advento da Indústria 4.0 é a transição dos sistemas de manufatura tradicionais para a automação dos processos industriais (fabricação e gestão). Com o aumento constante da quantidade de dados gerados a partir de registros de máquinas e Ordens de Serviços de manutenção, os setores industriais precisam buscar aplicar novas tecnologias da Indústria 4.0 para tratar e estruturar as informações do banco de dados e obter um melhor processo de gestão. O uso de tecnologias, como Big Data, pode ser aplicado para facilitar a leitura de dados para gerar estatísticas concretas para tomada de decisão no processo de manutenção. Este processo de gestão automatizado presente nesta nova era industrial é denominado Manutenção Inteligente (*Smart Maintenance*) ou Manutenção 4.0 (LUNDGREN; BOKRANTZ; SKOOGH, 2021).

A Indústria 4.0 contempla um conjunto de ferramentas como Big Data, Machine Learning, Internet das Coisas (IoT), Inteligência, Sistemas de Automação Artificial, Sistemas de Informação Cibernética Física, Computação em Nuvem, Sistemas Ciber-Físicos (CPS), Realidade Aumentada, Manufatura Aditiva, entre outros. Com a aplicação dessas tecnologias na manutenção, é possível obter uma gestão eficaz com maior nível de confiabilidade, robustez e principalmente prevenir os modos de falha (POÓR; BASL; ZENISEK, 2019).

A gestão da manutenção é uma atividade que permite a melhoria contínua e controlada dos processos com um ótimo aproveitamento dos recursos disponíveis e detecção de operações ou atividades críticas. O gerenciamento adequado da manutenção pode garantir alta produtividade e preservação do maquinário (BELINELLI, 2012).

Usinas hidrelétricas (UHEs) requerem esforços das equipes de operação e manutenção, pois sua indisponibilidade operacional pode resultar em altos custos inesperados. Portanto, é necessário estruturar uma política de manutenção forte e adequada para os ativos industriais nos sistemas de geração de energia. A agregação de tecnologias presentes na Indústria 4.0 permite a otimização dos processos decisórios e agilidade para a manutenção industrial, visando uma tomada de decisão robusta e eficaz (RUTAGAMA, 2019).

A disponibilidade e confiabilidade dos sistemas de geração de energia elétrica podem ser mantidas por meio de políticas de manutenção adequadas, possibilitando

antecipar falhas e eliminar suas causas. Assim, é imprescindível a adoção de decisões assertivas na gestão da manutenção que visem desenvolver uma política de manutenção eficaz, garantindo altos níveis de produtividade e otimizando custos e recursos.

Os hidrogeradores, ou unidades geradoras (UG's) são os principais ativos industriais em uma usina hidrelétrica. A ocorrência de falhas nesses ativos reduz a eficiência e pode interromper todo processo de geração de energia. A indisponibilidade do sistema de geração de energia demanda ações de manutenção onerosas para o restabelecimento dos ativos e pode incorrer em multas impostas por órgãos reguladores, como a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) no Brasil.

A principal função do setor de manutenção industrial é manter a disponibilidade e confiabilidade operacional de máquinas e equipamentos com desempenho adequado, assim, faz-se necessário analisar ativamente as falhas de máquinas e instalações fabris para atuar diretamente nas causas e modos das falhas, mitigando a sua ocorrência. A automatização da tomada de decisão nas atividades de gestão da manutenção em UHE's, visa reduzir os custos de produção do sistema de geração de energia elétrica e garantir o fornecimento de energia elétrica (confiabilidade do sistema).

Assim, este trabalho objetiva aplicar conceitos da Indústria 4.0, utilizando dados reais coletados de análises de componentes de usinas hidrelétricas, a fim de auxiliar a construção de planos de manutenção mais efetivos para melhoria operacional dos ativos industriais. A base deste sistema especialista é a aplicação do algoritmo de Processamento de Linguagem Natural (PLN) para estruturar um sistema de busca de informações textuais contidas no banco de dados de análise de falhas FMECA (Failure Mode Effects and Criticality Analysis) de ativos atuantes no processo de geração de energia elétrica. Este sistema especialista (Smart System) visa auxiliar engenheiros e gestores industriais a desenvolver planos de manutenção consistentes para bloquear modos de falhas crônicas em Usinas Hidrelétricas (UHEs).

1.1 Problema de pesquisa

É possível desenvolver um sistema especialista para auxiliar a gestão da manutenção, de forma eficiente e com baixo custo de implementação, considerando

a leitura, união e facilidade operação e interpretação das bases de dados pré-existentes em um sistema industrial?

1.2 Tema

Estruturação de um plano de manutenção adequado para um ativo industrial, apoiado pelo desenvolvimento de um sistema especialista para automatizar a construção do plano.

1.3 Justificativa

A geração de energia elétrica a partir de fontes hidrelétricas é uma das principais formas de produção de energia elétrica no Brasil e em muitos outros países. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), mais de 70% da energia gerada no Brasil é produzida a partir de usinas hidrelétricas. Esse setor é fundamental para garantir a segurança energética e o desenvolvimento econômico do país.

No entanto, a manutenção e o gerenciamento dessas usinas são atividades complexas e dispendiosas, que exigem um planejamento rigoroso e tecnologias avançadas. Atualmente, muitas empresas de geração de energia ainda utilizam métodos manuais e pouco eficientes para planejar a manutenção das usinas, o que pode resultar em atrasos, falhas e elevados custos. Nesse contexto, é importante desenvolver soluções tecnológicas que possam contribuir para a eficiência e a segurança do setor hidrelétrico.

Geralmente, os dados do histórico das atividades de manutenção e os parâmetros operacionais das máquinas são coletados a partir de registros informais e informações de texto, que são executados por operadores e/ou mantenedores. Isso dificulta a aplicação de uma análise estritamente quantitativa. No entanto, é possível aplicar PLN com algoritmos construídos sistematicamente para obter melhores resultados de busca por banco de textos com desempenho rápido e confiabilidade.

A ferramenta de qualidade FMECA tem uma importante aplicação na gestão da manutenção industrial, pois visa analisar as causas das falhas e seus efeitos, direcionando a identificação de ações preventivas eficazes. O uso da análise FMECA traz benefícios para o desenvolvimento dos planos de manutenção, mas sua estrutura textual de informações em formato de planilha pode impor uma lentidão na busca e

gerenciamento dessas informações, dificultando a construção da política de manutenção.

Desse modo, visa-se garantir um método e padrão de análise adequado, para um conjunto de dados e informações oriundos da Análise de Efeito e Criticidade de Modos de Falhas (FMECAS) de hidrogeradores elétricos, desenvolvido a partir de duas diferentes linguagens de programação, sendo elas Python e SQL, a fim de obter um Plano de Manutenção consistente para hidrogeradores, apontando modos de falhas críticos (de maior frequência e de maior tempo de reparo).

A implementação de um sistema especialista (*Smart System*) pode modificar a forma como os planos de manutenção são criados e gerenciados, contribuindo para a diminuição dos custos e a melhoria da eficiência das usinas hidrelétricas. Portanto, o desenvolvimento de um sistema especialista, usando processamento de linguagem natural, para criação de planos de manutenção em usinas hidrelétricas é uma iniciativa importante para o setor energético e para o desenvolvimento tecnológico e econômico do país.

Esta ferramenta integrada identifica os modos de falha crônicos do subsistema operacional, auxiliando os gerentes industriais a incorporar tarefas que visam fortalecer e aumentar a consistência do plano de manutenção no bloqueio dos modos de falha antes de suas ocorrências. Esta abordagem foi aplicada a um estudo de caso em um transformador trifásico de 525 Kv integrante de um hidrogerador para mostrar os resultados e entendimento do *Smart System* desenvolvido.

1.4 Objetivos

Para desenvolvimento do trabalho é determinado o objetivo geral conjuntamente com os objetivos específicos realizados para alcançá-lo.

1.4.1 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema especialista com a aplicação de técnicas de PLN em dados textuais e Linguagem de programação Python visando correlacionar dados e informações para suportar a elaboração de planos de manutenção robustos e automatizados.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Identificar, através da bibliografia vigente, características da manutenção e suas funções na Indústria 4.0;
- Analisar o registro de OS de manutenção do ativo industrial do estudo de caso;
- Analisar a tratativa de falhas estruturada no formulário FMECA do sistema estudo de caso;
- Criar um banco de dados com linguagem SQL para armazenar os dados obtidos a partir da análise dos registros, aplicáveis no sistema especialista;
- Utilizar programação e processamento de linguagem natural com linguagem Python para desenvolvimento do sistema;
- Aplicar o *Smart System* desenvolvido na criação de planos de manutenção por meio da correlação da base de dados do Transformador;
- Discutir os resultados e principais melhorias para obter um sistema de manutenção mais robusto e automatizado.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo serão abordados os principais conceitos acerca de gestão da manutenção na era da Indústria 4.0 e sistemas especialistas aplicados na gestão industrial.

2.1 Fundamentos da gestão da manutenção

Sistemas de produção industriais estão sujeitos à deterioração em consequência do uso e vida útil. Essa deterioração pode levar ao aumento dos custos de produção, menor qualidade e a possibilidade de um acidente (DOHI, et al., 2001). Portanto, um processo de manutenção adequado é importante para reduzir a probabilidade dessas ocorrências.

A manutenção é uma atividade essencial em qualquer organização, visando garantir a eficiência e a eficácia dos equipamentos, além de reduzir os custos de produção (MOREIRA, 2003). Sendo assim, a manutenção é uma área de grande importância para a indústria moderna, visto que a efetividade e eficiência dos equipamentos e sistemas de produção impactam diretamente na produtividade, segurança e qualidade dos produtos fabricados.

De acordo com a associação brasileira de normas técnicas, a norma brasileira NBR 5463 estabelece o procedimento básico de manutenção para qualquer tipo de equipamento ou instalação, definindo as etapas do processo de manutenção, desde o planejamento até a execução e controle das atividades. A norma conclui que, um planejamento adequado de manutenção visa garantir a eficiência, segurança e confiabilidade das operações.

Pode-se definir manutenção como o conjunto de atividades que tem como objetivo manter as instalações e equipamentos em pleno funcionamento, garantindo a disponibilidade e confiabilidade dos ativos utilizados. Essa manutenção pode ser preventiva, preditiva ou corretiva, dependendo da estratégia adotada pela empresa.

Segundo a norma ABNT NBR 5462 (2019) a manutenção corretiva é a manutenção efetuada após a ocorrência de uma falha (ou pane), destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida. A Manutenção Corretiva é o tipo de manutenção mais cara, que toma mais tempo e traz mais prejuízo financeiros para a empresa. Viana (2002) complementa que a manutenção corretiva é a intervenção necessária e imediata, que objetiva evitar graves consequências aos

equipamentos de produção, a segurança da operação ou ao meio ambiente. Se configura como uma intervenção aleatória, sem definições anteriores.

Já a manutenção preventiva é uma estratégia que tem como objetivo prevenir ou minimizar a ocorrência de falhas em equipamentos ou sistemas, por meio de um conjunto de atividades de inspeção, manutenção e reparo programadas.

Segundo Viana (2002) e Wireman (2003), a manutenção preventiva é aquela que se baseia na previsão da falha e na prevenção da sua ocorrência, através da realização de intervenções planejadas em intervalos de tempo pré-determinados, e é realizada antes da ocorrência de falhas ou desgaste excessivo dos equipamentos. Dentre as técnicas utilizadas na manutenção preventiva, destacam-se a análise de vibração, a termografia, a análise de óleo, a inspeção visual e a análise de desempenho.

A manutenção preditiva é uma estratégia de manutenção que se baseia em técnicas de monitoramento e análise de dados para identificar sinais precoces de problemas e realizar intervenções antes que uma falha ocorra.

Para o autor Wireman (2003), a manutenção preditiva é um método para determinar o estado atual de um ativo e prever quando falhas futuras podem ocorrer, com o objetivo de evitar as consequências adversas da falha.

A manutenção preditiva se diferencia de outras estratégias de manutenção por permitir que as intervenções sejam realizadas antes de uma falha ocorrer, reduzindo os custos com manutenção corretiva e aumentando a disponibilidade dos equipamentos. Além disso, a manutenção preditiva pode ajudar a maximizar a vida útil dos ativos e a aumentar a eficiência operacional.

A combinação de várias técnicas de monitoramento pode ajudar a identificar problemas em equipamentos antes que ocorram falhas graves, permitindo a realização de reparos e manutenções corretivas antes que o equipamento se torne inoperante.

2.2 Planejamento e Controle da Manutenção (PCM)

O planejamento da manutenção é uma atividade fundamental para garantir a disponibilidade, confiabilidade e segurança dos equipamentos e instalações, minimizando o risco de paradas não programadas e falhas operacionais.

De acordo com Rasmussen (1997), o planejamento da manutenção envolve o estabelecimento de estratégias e planos de ação que visam maximizar a eficiência e a efetividade das atividades de manutenção, de modo a assegurar a disponibilidade e a confiabilidade dos equipamentos.

O planejamento da manutenção deve ser realizado de forma integrada, considerando os aspectos técnicos, econômicos e operacionais da manutenção, bem como os objetivos e metas da organização. Além disso, é importante envolver todas as áreas da empresa, incluindo a produção, a engenharia e a gerência, para garantir uma visão holística e colaborativa do processo de manutenção. (DUFFUAA, RAOUF, CAMPBELL, 1999).

O planejamento da manutenção também inclui a definição de tarefas de manutenção preventiva, preditiva e corretiva, bem como a elaboração de planos de manutenção, que estabelecem as tarefas e os procedimentos necessários para a realização das atividades de manutenção. Além disso, é importante estabelecer indicadores de desempenho e monitorar continuamente os resultados das atividades de manutenção, a fim de identificar oportunidades de melhoria e de otimização do processo.

Dessa forma, o planejamento da manutenção é um processo complexo que envolve diversas ferramentas atividades e aspectos, que devem ser integrados e alinhados com os objetivos da organização. Algumas ferramentas que podem ser citadas para o planejamento da manutenção são FMECA e OS. É essencial para garantir a disponibilidade, confiabilidade e segurança dos equipamentos e instalações, minimizando os custos e maximizando a eficiência e efetividade das atividades de manutenção.

2.2.1 Análise de Criticidade e Modos de Falhas (FMECA)

A FMECA, do inglês *Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*, é uma técnica utilizada para avaliar a criticidade de sistemas, equipamentos ou processos e identificar os possíveis modos de falha e seus efeitos. É uma ferramenta de análise preventiva que permite antecipar e minimizar falhas e reduzir riscos.

Também considerada uma das técnicas mais eficazes para análise de riscos em sistemas complexos e críticos, permitindo identificar e priorizar os modos de falha com base em sua criticidade e probabilidade de ocorrência (BLANCHARD, 2003).

A FMECA é composta por três etapas principais: identificação dos modos de falha, avaliação da criticidade e definição de ações corretivas. Durante a identificação dos modos de falha, são listados todos os possíveis modos de falha que podem afetar o sistema ou equipamento em questão. Na etapa de avaliação da criticidade, é realizada uma análise qualitativa ou quantitativa para determinar a probabilidade de ocorrência, gravidade e detecção de cada modo de falha. Por fim, na etapa de definição de ações corretivas, são planejadas ações para minimizar ou eliminar os modos de falha de maior criticidade (BLANCHARD, 2003). A Figura 1 abaixo apresenta um modelo de composição do FMECA.

Figura 1 – Exemplo de layout da planilha FMECA

FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO FINAL	S	CAUSA	O	CRIT	CONTROLE	TIPO CONTROLE	D	NPR		
1 Barragem de terra												
Conter o reservatório	1 (1) Galgamento (falhas hidráulicas)	Erosão externa com formação de brecha	10	VI	Níveis de água excepcionais	1	I	10	Deplecionamento do reservatório e manutenção de borda livre	Prevenção	1	10
									Monitoramento dos níveis por sistema de telemetria	Deteção		
	1 (2) Movimento de massa	Instabilidade global com liberação descontrolada de água	10	VI	Carregamentos excepcionais	3	II	30	Construção de bermas estabilizadoras	Prevenção	4	120
									Deplecionamento do reservatório	Prevenção		
					Propriedades inadequadas dos materiais	1	I	10	Inspeção visual e instrumentação	Deteção		
									Construção de bermas estabilizadoras	Prevenção		
									Recompactação	Prevenção		
									Deplecionamento do reservatório	Prevenção		
	1 (3) Erosão interna	Piping com formação de brecha	9	V	Falha de projeto ou construção	3	II	27	Inspeção visual e instrumentação	Deteção	2	54
Diminuição da carga hidráulica (deplecionamento do reservatório)									Prevenção			
Lançamento de materiais de filtro e dreno									Prevenção			
1.1 Crista												
Permitir acesso à barragem	1.1 (1) Obstrução do acesso	Impossibilidade de execução de inspeções	1	I	Excesso de deformações	1	I	1	Reconstrução e recompactação	Prevenção	1	1
									Inspeção visual	Deteção		
Garantir a borda livre da barragem	1.1 (2) Deformação excessiva	Galgamento com erosão externa	10	VI	Recalques (inadequação de projeto ou construção)	1	I	10	Alteamento da crista	Prevenção	1	10
									Inspeção visual e monitoramento por campanhas topográficas	Deteção		

Fonte: Melo, 2014.

Em resumo, a FMECA é uma técnica poderosa para avaliação de riscos em sistemas e equipamentos, permitindo identificar modos de falha e priorizá-los com base em sua criticidade e probabilidade de ocorrência, para que ações preventivas possam ser planejadas e implementadas.

2.2.2 Plano de manutenção

O Plano de Manutenção é um documento que estabelece as atividades e procedimentos necessários para garantir a operação contínua e confiável de equipamentos, máquinas e instalações. Segundo Viana (2003) os planos de manutenção são um conjunto de informações essenciais para a prática de

manutenção, contendo o detalhamento da estratégia de manutenção assumida pela empresa.

De acordo com Santos (2010) o plano de manutenção deve conter informações como a descrição detalhada das atividades de manutenção a serem realizadas, o intervalo de tempo entre cada atividade, os recursos necessários para a execução do serviço, as responsabilidades das equipes envolvidas, entre outras informações relevantes.

Além disso, deve ser atualizado periodicamente, considerando as alterações nas condições de operação, a evolução tecnológica dos equipamentos e as novas recomendações dos fabricantes.

O plano de manutenção é um documento fundamental para a gestão da manutenção, permitindo o planejamento e organização das atividades necessárias para garantir a disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos, além de contribuir para a redução de custos e aumento da vida útil dos equipamentos.

2.3 A manutenção na Indústria 4.0

A Indústria 4.0 é um conceito que tem ganhado destaque na literatura recente sobre a gestão e a transformação digital das empresas. Os autores Schwab (2016) e Kagermann et al. (2013) definem a Indústria 4.0 como uma nova fase da revolução industrial que se caracteriza pela integração entre tecnologias avançadas de automação, internet das coisas, inteligência artificial, análise de dados e outras inovações digitais.

De acordo com a visão de Kagermann et al. (2013), a Indústria 4.0 representa uma mudança radical na forma como as empresas produzem, distribuem e consomem bens e serviços, com impactos significativos na competitividade e na sustentabilidade dos negócios. O autor Schwab (2016) destaca que a Indústria 4.0 pode trazer benefícios como a redução de custos, o aumento da eficiência produtiva, a personalização em massa e a criação de novos modelos de negócios.

Nesse contexto, pode-se afirmar que a Indústria 4.0 é uma transformação disruptiva no setor produtivo, impulsionada pela convergência de tecnologias digitais avançadas.

A manutenção de máquinas na Indústria 4.0 é uma abordagem que utiliza tecnologias avançadas, como IoT e a inteligência artificial (IA), para melhorar a

eficiência e a confiabilidade dos processos de manutenção. Krämer afirma que a manutenção preditiva é uma das principais estratégias da manutenção na Indústria 4.0, pois permite a detecção precoce de falhas e a tomada de decisões baseadas em dados.

A manutenção na Indústria 4.0 é baseada em sistemas inteligentes que monitoram continuamente o desempenho das máquinas e equipamentos, utilizando sensores e algoritmos para detectar anomalias e prever falhas antes que elas ocorram. Esses sistemas também permitem a programação de intervenções de manutenção de forma mais eficiente, reduzindo o tempo de parada da produção (BORLIDO, 2017).

Na manutenção de máquinas na Indústria 4.0, o uso de tecnologias avançadas, como a inteligência artificial, a big data e o processamento de linguagem natural, são cada vez mais comuns. Essas tecnologias permitem a análise de grandes volumes de dados gerados pelas máquinas e equipamentos, identificando padrões e anomalias que podem indicar a necessidade de manutenção ou reparo.

A inteligência artificial, por exemplo, é capaz de aprender com os dados coletados pelos sensores das máquinas e criar modelos preditivos que permitem a detecção precoce de falhas. Além disso, ela pode ser utilizada para otimizar a alocação de recursos de manutenção, garantindo que os técnicos estejam disponíveis quando e onde são necessários.

Já a tecnologia Big Data é utilizada para armazenar e processar grandes volumes de dados de diferentes fontes, permitindo que os gestores de manutenção tenham acesso a informações relevantes para a tomada de decisão. Com essa tecnologia, é possível identificar padrões de falha em equipamentos similares, por exemplo, e antecipar problemas em outras máquinas.

O processamento de linguagem natural é outra tecnologia que pode ser utilizada na manutenção de máquinas na Indústria 4.0. Ela permite a comunicação entre humanos e máquinas de forma mais natural, facilitando a interpretação de comandos e instruções. Além disso, pode ser utilizada para criar assistentes virtuais que auxiliam os técnicos de manutenção na identificação e solução de problemas.

Sendo assim, o uso de inteligência artificial, Big Data e processamento de linguagem natural na manutenção de máquinas na Indústria 4.0 é uma tendência que permite a análise de grandes volumes de dados, a criação de modelos preditivos e a

otimização da alocação de recursos de manutenção. Essas tecnologias contribuem para a redução de custos e aumento da confiabilidade dos equipamentos.

2.4 Sistemas especialistas aplicados na gestão industrial

Os sistemas especialistas são sistemas computacionais que utilizam conhecimento especializado em uma área específica para tomar decisões ou solucionar problemas. Eles simulam o raciocínio humano em uma determinada área do conhecimento e são capazes de lidar com problemas complexos.

Para Duda e Hart (1973), os sistemas especialistas são sistemas de computador que utilizam conhecimento específico de um domínio para solucionar problemas relacionados a esse domínio. São projetados para lidar com problemas complexos que exigem uma grande quantidade de conhecimento especializado. Os sistemas especialistas são construídos por meio da utilização de técnicas de inteligência artificial e de programação baseada em regras.

O histórico de desenvolvimento dos sistemas especialistas é bastante extenso. Os primeiros sistemas especialistas surgiram na década de 1960, mas foi na década de 1970 que o desenvolvimento desses sistemas começou a ganhar força. Nessa época, foram desenvolvidas ferramentas e técnicas específicas para a criação de sistemas especialistas.

Atualmente, os sistemas especialistas possuem diversas aplicações em diferentes áreas. Na indústria, por exemplo são utilizados para desenvolver, monitorar e controlar processos e na engenharia, são utilizados para projetar e otimizar sistemas complexos.

Como, por exemplo, o trabalho de Li (2021) que desenvolve um sistema especialista que explora relatórios de inspeção de infraestrutura de pontes nos EUA e as classifica de acordo com as informações descritivas e qualitativa dos inspetores. Já Caldas et al. (2002) cria modelos de classificação para categorizar documentos de projeto de construção, como especificações, atas de reunião e relatórios de campo em 13 categorias predefinidas, usando inteligência artificial e modelos baseados em machine Learning.

A construção de sistemas especialistas requer uma combinação de conhecimento especializado, uma base estruturada, um mecanismo de inferência

para tomar decisões ou fazer recomendações e uma interface de usuário que permita interações eficazes. A possibilidade de utilizar linguagens de programação como Python para desenvolvimento, SQL para gerenciar bases de dados e PLN para analisar dados textuais, aumenta a capacidade do sistema de gerar resultados específicos, como planos de manutenção. Ao aproveitar essas ferramentas tecnológicas, os sistemas especialistas podem automatizar a tomada de decisões em domínios complexos, tornando-se valiosos para otimizar processos e melhorar o desempenho operacional.

Também sobrinho et. al (2022) caracteriza o estado de uma ferrovia usando dados de vagões instrumentados e registros textuais da equipe de manutenção. A extração de conhecimento é aprimorada ao associar registros textuais tratados com PLN com medições do vagão, fortalecendo a análise da infraestrutura.

Já o trabalho de Soares (2022) estrutura um plano de manutenção utilizando informações do FMEA para a construção de análise RAM com aplicação de um sistema especialista que utiliza consulta estruturada com SQL e linguagem de programação Python.

Sendo assim, os sistemas especialistas representam uma inovação crucial na área da inteligência artificial, simulando o raciocínio humano em domínios específicos. Seu desenvolvimento ao longo das décadas, utilizando técnicas como inteligência artificial e programação baseada em regras, resultou em aplicações variadas e comprovadamente benéficas, desde a indústria até a engenharia. A utilização de linguagens como Python, SQL e PLN, exemplificam como podem otimizar processos complexos.

2.4.1 Processamento de linguagem natural (PLN) aplicado na construção de sistemas especialistas

O PLN é uma tecnologia que permite que os sistemas computacionais interpretem e produzam linguagem humana, seja em forma de texto ou voz. Essa tecnologia tem sido amplamente utilizada no desenvolvimento de sistemas especialistas, auxiliando na interação entre o usuário e o sistema.

Para Jurafsky e Martin (2008), o processamento de linguagem natural é uma área multidisciplinar que combina conhecimentos de linguística, ciência da computação e inteligência artificial para a construção de sistemas que lidam com a

linguagem natural. Essa tecnologia permite que os sistemas especialistas interpretem informações em linguagem natural, como textos ou voz, facilitando a interação com o usuário.

Os sistemas especialistas que utilizam o PLN como ferramenta são capazes de entender perguntas complexas feitas em linguagem natural e fornecer respostas relevantes e precisas para o usuário. Por exemplo, em sistemas especialistas na área de saúde, o usuário pode perguntar sobre sintomas de uma doença e receber respostas sobre possíveis diagnósticos ou tratamentos.

Além disso, o PLN pode ser utilizado para extrair informações relevantes de grandes quantidades de dados, como registros médicos ou relatórios financeiros. Essas informações podem ser utilizadas para alimentar os sistemas especialistas, permitindo a construção de sistemas mais precisos e eficientes.

Para a aplicação do PLN é comum a utilização de técnicas de acordo com a complexidade do seu processo de compreensão e manipulação da linguagem. Linguagens de programação em R e Python são altamente utilizadas para execução dessas técnicas, as quais podem ser citadas:

- **Tokenização:** É o processo de segmentação do texto em frases e palavras, quebra a sequência de caracteres em um texto localizando o limite de cada palavra, ou seja, os pontos onde uma palavra termina e outra começa [Palmer, 2010]. Para fins de linguística computacional, as palavras assim identificadas são frequentemente chamadas de tokens.
- **Remoção de stopwords e pontuações:** Nesse processo, é realizado a identificação de palavras pronomes, preposições e pontuações no token. A partir disso, dessas identificadas, as que oferecem pouco ou nenhum valor ao objetivo do programa são filtradas excluídas do texto a ser processado. É possível delimitar previamente com segurança a lista de palavras que fazem parte dessas stopwords (palavras de parada, traduzido para o português). No português é possível considerar “o”, “a”, “e”, “um”, “uma” como stopwords. Cada idioma contém seu conjunto de stopwords e pontuações específicas que podem ser retirados dos textos.
- **Lematização:** A lematização é o ato de representar as palavras através do infinitivo dos verbos e masculino singular dos substantivos e adjetivos. No contexto puramente lexicográfico, a palavra dicionarizada recebe a denominação de lema ou forma canônica. Assim, a representação gráfica das

palavras recebe o nome de lemas ou formas canônicas, quando a palavra é representada pelo singular masculino para substantivos e adjetivos e infinitivo para verbos.

2.4.2 Técnicas de aplicação de inteligência artificial em dados textuais

Na tecnologia, a IA é a inteligência demonstrada por máquinas ao executar tarefas associadas a seres inteligentes, visando criar programas e algoritmos que possam perceber, raciocinar e tomar decisões de forma autônoma para a resolução de problemas. Os sistemas de inteligência artificial são projetados para simular certos aspectos da inteligência humana, como o processamento de linguagem natural, o reconhecimento de padrões, o planejamento estratégico e a tomada de decisões. Eles são desenvolvidos para aprender com dados e experiências, adaptando-se e melhorando seu desempenho ao longo do tempo (RUSSELL, NORVIG, 2013).

Existem diferentes abordagens e técnicas dentro da inteligência artificial, incluindo aprendizado de máquina (*machine learning*), redes neurais, lógica fuzzy, sistemas especialistas, processamento de linguagem natural e visão computacional. Cada uma dessas áreas tem suas próprias metodologias e algoritmos específicos para lidar com problemas e tarefas específicas. (RUSSELL, NORVIG, 2013)

Dentro do campo de estudo do processamento de linguagem natural, pode-se aplicar o conceito de IA para medir a importância de um termo em relação a um documento e o nível de similaridade entre dois textos.

Para medir a importância de um termo em relação a um documento, pode ser aplicado a medida estatística de frequência do termo–inverso da frequência nos documentos (abreviação do inglês *term frequency–inverse document frequency* TF x IDF) que tem o intuito de indicar a importância de uma palavra de um documento em relação a uma coleção de documentos ou em um corpus linguístico. A pesquisa conduzida por Breitinger, Corinna; Gipp, Bela e Langer, Stefan em 2015 mostrou que 83% dos sistemas de recomendação baseados em texto em bibliotecas digitais usam TF-IDF. Sendo assim, TF-IDF pode ser calculado de acordo com Equação 1:

$$tf \times idf_{(t,d)} = tf_{(t,d)} \times idf_{(t)} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde TF é a frequência da palavra no documento atual, e que é calculado pela divisão do número de vezes em que o termo (t) aparece em um documento (d) pela quantidade de total de termos em um documento, como mostra a Equação 2 a seguir:

$$tf_{(t,d)} = \frac{\text{frequência de t em d}}{\text{total de t em d}} \quad (\text{Eq. 2})$$

Além disso, IDF deve ser calculado e representa o quão incomum é a palavra (N) nos documentos e seu cálculo é mostrado pela Equação 3:

$$idf_{(t)} = \log \frac{N}{1+df} \quad (\text{Eq. 3})$$

O valor de TF-IDF revela que, quanto maior o seu valor, mais raro é o termo comparado ao banco de dados, e, sendo assim, quanto menor o valor, mais comum é o termo.

A partir disso, a fim de obter a similaridade entre os textos, pode-se utilizar o cálculo de similaridade por cosseno, que busca da semelhança entre dois vetores em um espaço vetorial avaliando o cosseno do ângulo compreendido entre eles. (YATES, NETO, 2011).

A sua fórmula é descrita de acordo com a Equação 4:

$$sim_{cos}(\vec{x}, \vec{y}) = \frac{\vec{x} \times \vec{y}}{\|\vec{x}\|_2 \|\vec{y}\|_2} \quad (\text{Eq.4})$$

Para tal equação, é necessário comparar dois vetores (x e y) e, para esses dois vetores, será fornecido um valor no intervalo [0,1]. Quanto mais próximo de 0 for o valor da similaridade por cosseno, mais próximo serão as sentenças.

O uso desses dois conceitos em conjunto busca encontrar os textos que mais possuem correlação, sendo assim, é possível extrair informações a partir de palavras chaves estabelecidas para que sejam usadas como comparativo.

2.4.3 Linguagem de programação Python aplicada no desenvolvimento de sistemas especialistas

As linguagens de programação representam abordagens padronizadas para implementar código fonte, definidas por um conjunto de regras sintáticas e semânticas, que podem ser compiladas e transformadas em programas de computador (FISHER; GRODZINSKY, 1993). Segundo Fangohr et al (2019), ao abordar a modelagem computacional de processos, é necessário distinguir duas etapas: a primeira consiste em desenvolver um modelo que possa descrever o sistema real por meio de equações, enquanto a segunda etapa envolve a resolução desse modelo de equações com a utilização de métodos computacionais, ou seja, uma linguagem de programação.

Python, por sua vez, é uma linguagem de programação amplamente reconhecida por sua rica coleção de bibliotecas, recursos de depuração e uma comunidade ativa que oferece suporte a desafios complexos. A linguagem se destaca pela sua capacidade de gerenciar e processar grandes volumes de dados (KÖRBER; FROMMEL, 2019).

Dentre suas principais vantagens estão a abordagem de alto nível e uma sintaxe moderna e legível, o que facilita a redação de códigos organizados, compreensíveis e de fácil manutenção, além de ser uma linguagem de uso gratuito. Fangohr et al (2019) argumenta que o custo de um projeto computacional não é determinado apenas pelo tempo de execução. O custo do desenvolvimento e da manutenção do programa também desempenha um papel crucial.

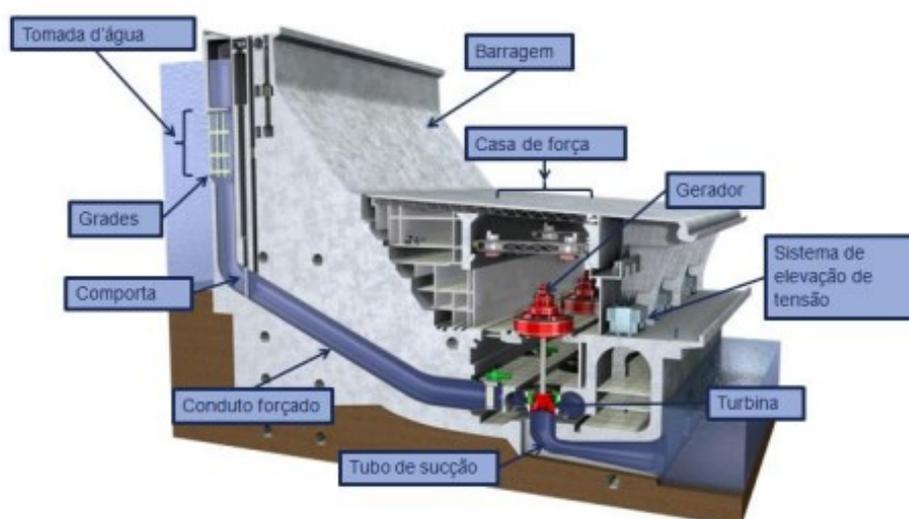
Para facilitar o desenvolvimento, os ambientes de desenvolvimento integrados (IDEs), como ferramentas de codificação, possibilitam que os programadores escrevam, testem e depurem seus códigos, visando aprimorar a produtividade na programação. O IDE utilizado nesse trabalho será o Jupyter notebook, que possui como vantagens a facilidade para criar protótipos de forma rápida, execução e visualização da saída do código em cada célula, possibilidade de integração com o sistema operacional do computador, para armazenamento e integração com banco de dados e interface amigável, entre diversos outros recursos, utilizando a versão do Python 3.9.

2.5 Usinas Hidrelétricas (UHEs)

Uma usina hidrelétrica tem por finalidade primordial gerar energia elétrica por meio da exploração do potencial hidráulico inerente a um curso d'água. Esse potencial é delineado pela vazão hidráulica e pela aglomeração de desníveis presentes ao longo do trajeto fluvial. Tal cenário pode se configurar de maneiras distintas: naturalmente, quando um desnível se concentra em uma cachoeira; por meio da instalação de uma barragem, quando pequenos desníveis são unificados na altura da construção; ou através do desvio do fluxo do rio de seu curso natural, centralizando os pequenos desníveis nesse desvio (MACEDO, 2015).

Uma típica usina hidrelétrica é composta por uma grande estrutura para represamento de água denominada de barragem, outra estrutura para permitir a passagem do excesso de água acumulada, chamada de vertedouro. Também conta com uma estrutura para comportar as unidades hidrogeradoras (UHG) e outros componentes auxiliares, como a casa de força além de uma edificação para direcionar a água represada a UHG (conduto forçado) e um conjunto de equipamentos para elevar a tensão gerada, denominados de transformadores elevadores (TRALLI, 2018). Uma usina hidrelétrica e suas principais estruturas é evidenciada na Figura 2.

Figura 2 – Representação de uma usina hidrelétrica típica



Fonte: Voith Hydro, 2015

Tralli (2018) evidência também que é por meio de linhas de transmissão e de transformadores que a energia gerada pelas usinas hidrelétricas é transmitida aos

consumidores, fazendo a redução da tensão para níveis compatíveis daquelas que serão consumidas.

A principal vantagem das usinas hidrelétricas reside na conversão limpa do recurso energético natural, destacando-se a ausência de emissões de resíduos poluentes e o custo reduzido da produção de energia. Isso se deve ao fato de que o elemento essencial para geração de energia, a água do rio, encontra-se intrínseco ao funcionamento da usina.

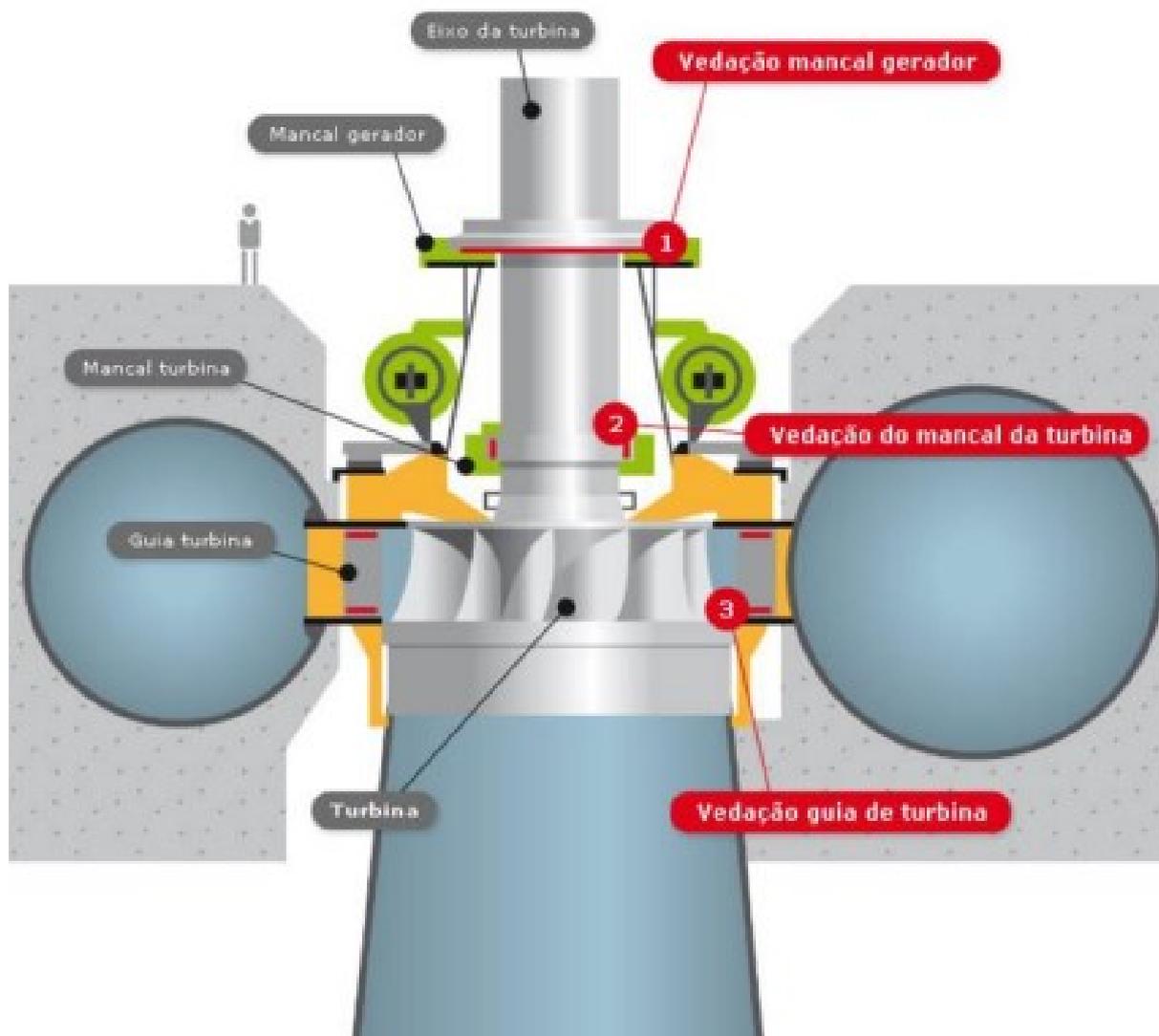
2.5.1 Turbinas Hidráulicas

As turbinas hidráulicas se configuram como a máxima expressão das máquinas de fluxo em solo brasileiro, uma vez que delas provêm mais de 70% do potencial elétrico nacional (ANEEL, 2021). O espectro de aplicabilidade de distintos tipos de turbinas hidráulicas é determinado por um intrincado sistema de fatores, tais como a queda de altitude, a taxa de fluxo e a capacidade de potência. Existem regiões que demandam a adoção de mais de um tipo de máquina, fato este que enseja a utilização de critérios adicionais para a seleção, tais como o valor do gerador elétrico, a probabilidade de ocorrência de cavitação, a flexibilidade de utilização, a construção civil, a facilidade de operação, dentre outras vertentes, objetivando a escolha da máquina mais adequada para determinada aplicação (HENN, 2006).

No Brasil, as turbinas hidráulicas mais amplamente utilizadas são as turbinas Francis, seguidas das turbinas Kaplan e Pelton, devido a sua eficácia e versatilidade (ANEEL, 2021).

A turbina Francis, em particular, é bastante comum em usinas hidrelétricas devido a sua habilidade de se adaptar a diferentes condições de vazão e altura de queda. Essa turbina é classificada como de fluxo radial, no qual a água é conduzida através da caixa espiral, pré-distribuidor e finalmente atinge o rotor radialmente, saindo em direção axial para o tubo de sucção. A Figura 3 apresenta a geometria da turbina Francis e seus componentes primários (Macedo, 2015).

Figura 3 – Turbina hidráulica tipo Francis



Fonte: Macedo, 2015, pág. 24

Este trabalho propõe em aplicar os estudos de manutenção em uma turbina hidráulica do tipo Francis, focado no sistema transformador de potência de 525 Kv.

O transformador de potência tem como objetivo elevar a tensão da energia elétrica gerada pelo gerador para uma tensão mais alta, adequada para a transmissão de energia elétrica em grandes distâncias, visto que a energia elétrica gerada na usina hidrelétrica é produzida em uma tensão baixa, na faixa de 11 Kv. O transformador de potência usado no estudo eleva essa tensão para uma voltagem de 525 Kv, adequada para a transmissão da energia elétrica a grandes distâncias através das linhas de transmissão de alta tensão.

O processo de elevação de tensão permite que a energia elétrica possa ser transmitida com menor perda de energia devido a resistência das linhas de transmissão, o que a torna mais eficiente e econômica.

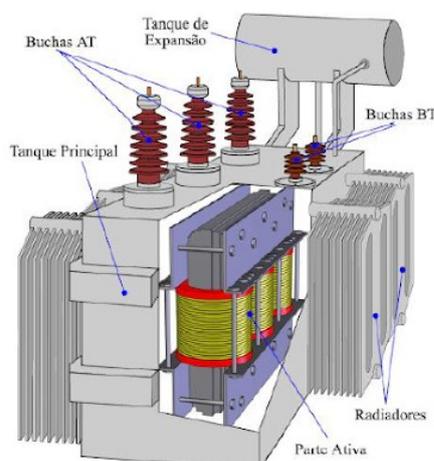
Uma falha no transformador pode levar à interrupção da energia elétrica gerada pela usina, o que pode causar grandes prejuízos financeiros para a usina e para os consumidores que dependem da energia elétrica gerada por ela. Além disso, uma falha em um transformador de potência de alta tensão pode levar a um arco elétrico e explosão, o que pode causar danos materiais, ferimentos e até mesmo mortes. Por essa razão, os transformadores de potência devem ser projetados e operados com altos níveis de segurança e confiabilidade, seguindo rigorosas normas e padrões de segurança.

2.5.2 Transformadores elevadores de potência

O transformador em uma usina hidrelétrica é um componente fundamental que desempenha um papel crucial na distribuição eficiente de energia elétrica gerada pela usina. Ele é projetado para aumentar ou diminuir a tensão da eletricidade, permitindo sua transmissão através de linhas de transmissão de alta tensão e, subsequentemente, sua distribuição a consumidores em tensões apropriadas (SOARES, 2019).

A Figura 4 apresenta um esquema de um transformador de potência. O transformador de potência é um transformador trifásico, e o modelo apresentado abaixo é frequentemente utilizado em subestações para elevação ou abaixamento.

Figura 4 – Transformador elevador trifásico de potência

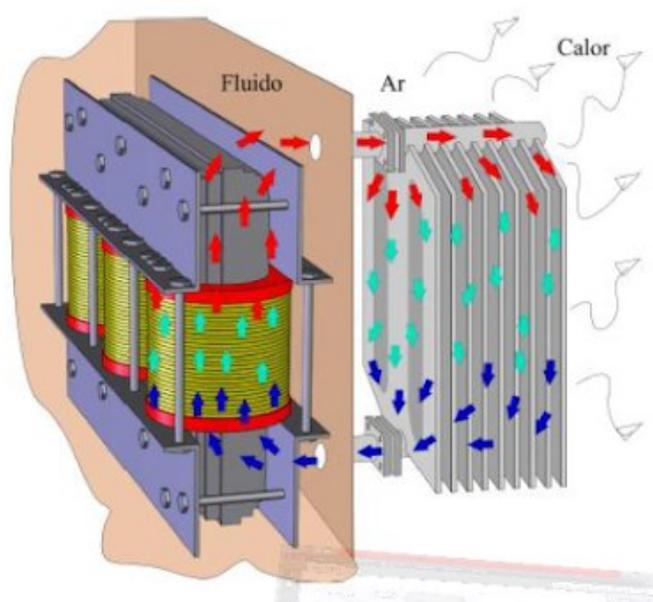


Fonte: UniverTec, 2013

Observa-se pela Figura 4 a presença das buchas de Alta Tensão, sendo as maiores e das de Baixa Tensão, as menores, onde os cabos são conectados para fins de transmissão ou distribuição de energia elétrica. O tanque principal é um compartimento que abriga a parte ativa do transformador, que consiste nos enrolamentos, e é preenchido com um fluido dielétrico comumente conhecido como óleo mineral. Devido ao aquecimento considerável dos enrolamentos da parte ativa, é essencial a existência de um sistema de resfriamento. Portanto, a parte ativa é imersa em óleo, que não apenas contribui para a isolação elétrica, mas também facilita a dissipação de calor para o ambiente circundante. Esse processo ocorre quando o óleo aquecido se desloca para a parte superior do tanque e é direcionado através de tubulações para os radiadores (UNIVERTEC, 2013).

No sistema de refrigeração de um transformador, ocorre a transferência de calor através dos fenômenos de radiação térmica e convecção. Esse sistema pode ser configurado com radiadores, radiadores acompanhados de ventiladores, ou mediante a inclusão de bombas e trocadores de calor. A Figura 5 a seguir representa um sistema de resfriamento utilizando radiadores em conjunto com ventiladores. (SOARES, 2019).

Figura 5 – Sistema de resfriamento do tipo radiador e ventilador



Fonte: UniverTec, 2013

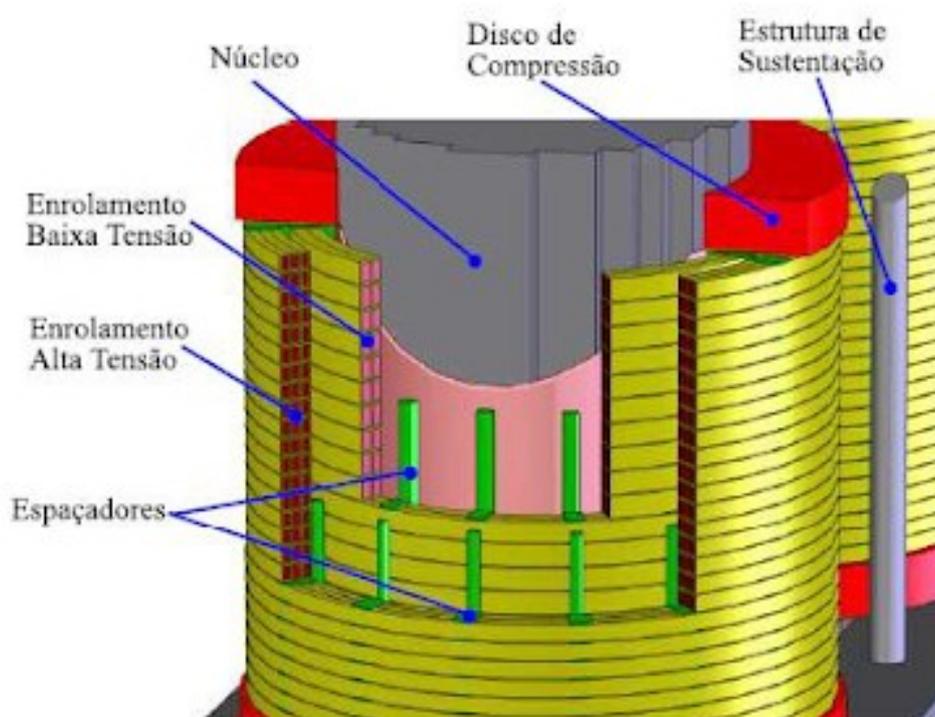
O dimensionamento desse sistema está diretamente relacionado à potência de operação e ao espaço disponível para a instalação do transformador. Quando as

condições de espaço são extremamente restritas, sugere-se a utilização de métodos de resfriamento mais eficazes, como os trocadores de calor. (SOARES, 2019).

O fluido isolante deve ocupar completamente o reservatório do transformador, o que requer acomodar as mudanças no volume do fluido devido às variações de temperatura do equipamento. O tanque de expansão ou compensação do transformador desempenha o papel de criar espaço adicional para acomodar o aumento de volume do fluido em caso de aumento de temperatura, ou manter uma reserva de fluido quando a temperatura diminui. (UNIVERSETEC, 2013).

Na seção ativa, os enrolamentos de baixa tensão são posicionados abaixo dos enrolamentos de alta tensão. Os condutores geralmente são feitos de cobre, ocasionalmente de alumínio, e têm uma forma retangular para facilitar sua organização no núcleo. A Figura 6 oferece uma visão detalhada da parte ativa de um transformador.

Figura 6 – Parte ativa do transformador



Fonte: UniveTec, 2013

Os condutores são isolados utilizando um material isolante feito de celulose, conhecido como papel isolante. As propriedades isolantes desse papel são aprimoradas quando as fibras de celulose são saturadas com o óleo isolante. Além

disso, a parte ativa do transformador é submetida à compressão por meio de um disco de compressão, a fim de prevenir qualquer movimento vertical indesejado. (UNIVERSETEC, 2013).

3. METODOLOGIA DE PESQUISA

Neste tópico serão abordados a classificação da metodologia aplicada, trabalhos correlacionados, o processo de desenvolvimento do trabalho e a visualização da proposta do sistema especialista para o desenvolvimento do Trabalho de Conclusão de Curso

3.1 Classificação da metodologia

Uma pesquisa pode ser classificada de acordo com alguns critérios, podendo ser: finalidade, objetivo, abordagem, método e procedimento.

A fim de buscar resolver um problema específico que já é conhecido, com uso de novos conhecimentos na prática industrial, a finalidade desta pesquisa é aplicada.

Já quanto ao objetivo, classifica-se a pesquisa como descritiva, visto que busca retratar as características do objeto estudado, expondo com precisão os fatos ou fenômenos, para estabelecer a natureza das relações entre as variáveis delimitadas no tema.

Em relação a abordagem, este trabalho busca resultados através da aplicação de técnicas estatísticas, probabilísticas e analisar os dados textuais disponibilizados, adotando assim uma abordagem híbrida, sendo tanto quantitativa como qualitativa.

Quanto ao método, é adequado classificar a pesquisa como indutivo em razão de se obter um plano geral para manutenção das UHE partindo de registros particulares em relação ao sistema usado como estudo.

O procedimento usado classifica-se em estudo de caso, em virtude de analisar os dados obtidos empiricamente de um sistema de resfriamento, de uma UHE.

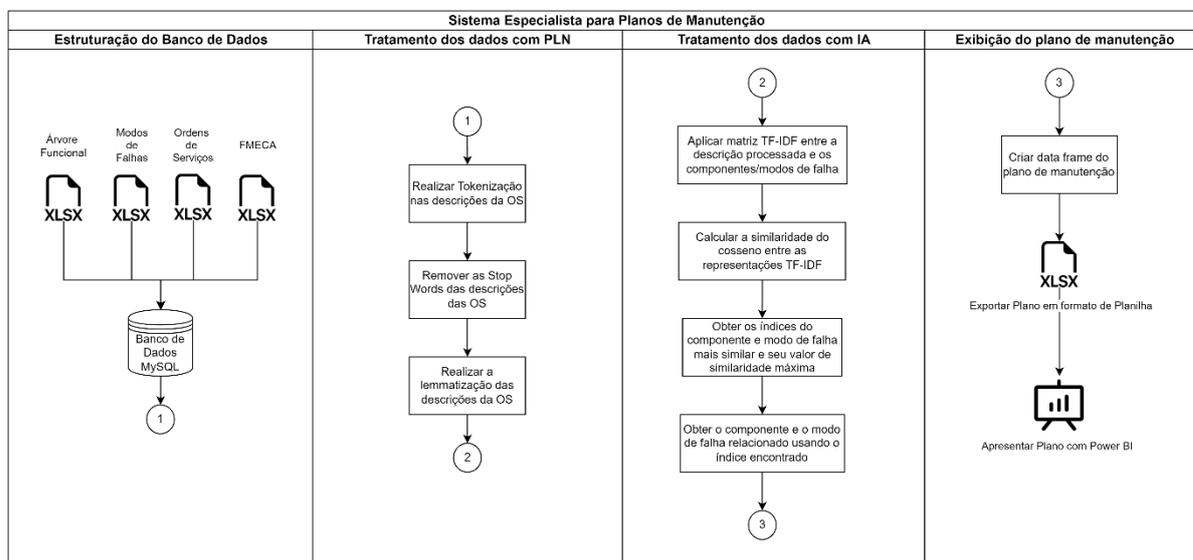
Por fim essa pesquisa se enquadra na área de Engenharia III, no campo de Gerência de Produção, com código 30801001 frente a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, 2021).

3.2 Arquitetura do sistema especialista

O sistema especialista apresentado neste trabalho foi arquitetado a partir dos seguintes processos: estruturação do banco de dados, tratamento dos dados com PLN, Tratamento dos dados com IA e exibição do plano de manutenção. A Figura 7

apresenta o fluxograma com conector de fluxo das ações realizadas em cada processo.

Figura 7 – Arquitetura do sistema especialista



Fonte: autoria própria (2023)

As atividades dos processos na Figura 7 são detalhadas a seguir:

Inicialmente, é necessário estabelecer um local em que todos os dados irão ser armazenados, com objetivo de centralizar a informação e unificar o caminho de processamento. Para tal atividade, o sistema propõe obter informações relacionadas a árvore funcional do sistema de estudo, os dados e informações oriundos da tratativa de falhas realizada pela ferramenta FMECA, abastecendo-os em um sistema de gerenciamento de banco de dados (SGDB) escolhido, o MySQL.

A partir do armazenamento, os 112 registros textuais das descrições da OS receberão o tratamento de PLN através da segmentação das palavras com a tokenização, remoção das palavras que possuem apenas significado sintático dentro das sentenças, que não agregam informações relevantes sobre seu sentido (Stop Words) e representação das palavras contidas nas descrições através do infinitivo dos verbos e masculino singular dos substantivos e adjetivos, com aplicação da técnica de lematização dos vetores estabelecidos.

Posteriormente, as informações textuais tratadas serão comparadas com os componentes e modos de falhas usando IA, com o objetivo de classificar, a partir da descrição da OS, o componente e modo de falha relacionado. Para tal, será necessário calcular o TF-IDF com o uso da Equação 1.

Além disso, para buscar a medida de similaridade será usado nesta etapa a similaridade por cosseno que avalia o valor do cosseno aplicando a Equação 4 buscando o valor do ângulo compreendido entre os dois vetores estabelecidos.

Por fim, os termos mais similares serão correlacionados e, com a utilização do FMECA, o plano de manutenção será estruturado, podendo ser exportado em formato de planilha e visualizado através do Power BI, um serviço de análise e visualização de dados da Microsoft.

3.3 Trabalhos correlatos

Apresentar-se-á estudos científicos correlatos a pesquisa desenvolvida neste trabalho, sendo a comparação entre os estudos analisadas pelos seguintes quesitos:

- Identificação do sistema industrial: mapeamento do processo (observação direta), pesquisa documental, levantamento de dados (pesquisa em campo) e estudo de caso;
- Variáveis analisadas para o tratamento de falhas: disponibilidade, taxas de falha, FMECA, FMEA e histórico de falhas (descrição das OS's)
- Ferramentas para tratamento da análise de dados: Atividades de Manutenção preventiva e preditiva, árvore funcional, PLN, IA, matriz TF-IDF, similaridade entre cossenos, correlação estatística entre as variáveis de processo;
- Ferramenta para tratamento dos resultados: ferramentas da qualidade aplicadas, FMECA e indicadores de desempenho de manutenção e produtividade.

O Quadro 1 a seguir apresenta a comparação entre os estudos:

Quadro 1 – Estudos correlatos

Autor(es)	Aplicação	Identificação do Sistema Industrial				Variáveis analisadas para Tratamento de Falhas				Ferramenta para Análise de dados						Ferramenta para tratamento dos resultados		
		Mapeamento do Processo	Pesquisa Documental	Levantamento de Dados	Estudo de Caso	Taxa de falha	Criticidade	Causas de falhas	Histórico de Falhas	Manutenção Prev/Pred	Árvore Funcional	PLN	IA	TF-IDF	Similaridade entre cossenos	Ferramentas Qualidade	FMECA	Indicadores Manutenção e Produção
Naqvi et al. (2021)	Indústria Aeronáutica	-	X	X	-	-	X	X	X	-	X	X	X	-	-	X	-	-
Sala et al (2002)	Indústria de Embalagens	-	X	X	-	X	-	X	X	-	-	X	X	X	-	X	-	-
Osvaldo Gogliano Sobrinho et al (2022)	Infraestrutura Ferrovia Vitória	X	X	X	X	-	X	X	X	X	-	X	-	-	-	X	X	X
Marzec et al (2014)	Fabricante de Ônibus	X	X	X	X	-	-	X	X	X	X	X	X	-	X	X	-	X
SELIM et.al (2015)	Industria de alimentos	X	X	X	X	-	-	X	X	X	X	X	X	X	-	X	-	X

Soares e Belinello (2022)	Industria Papeleira	X	X	X	X	X	X	-	X	-	X	-	X	-	-	X	-	X
Toni e Belinello (2023)	Usina Hidrelétrica	X	X	X	X	X	X	X	X	-	X	X	X	X	X	X	X	X

Fonte: Autoria própria

Naqvi, Ghufuran, Meraghni et al (2022) aplicaram o PLN para analisar mil amostras de OS de manutenção de aeronaves, utilizando uma abordagem de Raciocínio Baseado em Casos (CBR), para encontrar correspondências semânticas e solucionar problemas apoiando-se em experiências anteriores. Entretanto, neste trabalho, é utilizado o modelo BERT para aplicação de técnicas de ajuste fino não supervisionado.

Sala, Pirola, Pezzotta e Cavalieri (2022) analisaram 340 documentos com intervenções e registros de manutenções em uma empresa com máquinas de envase e embalagens, escritas em três diferentes idiomas (inglês, italiano e espanhol), distribuídos por sete anos (2014-2021). Para o estudo foi aplicado as técnicas de PLN e utilizado a matriz TF-IDF para calcular a importância relativa de um token dentro de um documento em relação a todo o corpus. Como resultado, os autores encontraram que os principais tópicos abordados nos documentos se referem a comunicação, dimensional e instalação. O autor sugere como pesquisa futura o desenvolvimento de FMECA e o cálculo do número de prioridade de risco (NPR) para identificar problemas e induzir o redesenho dos componentes para garantir uma maior disponibilidade para produção

Sobrinho et. al (2022) caracterizaram o estado de uma ferrovia usando dados de vagões instrumentados e registros textuais da equipe de manutenção. A extração de conhecimento é aprimorada ao associar registros textuais tratados com PLN com medições do vagão, fortalecendo a análise da infraestrutura.

Marzec, uhl e michalak (2014) aplicaram técnicas de mineração de texto utilizando PLN para otimizar a política de manutenção de uma empresa de fabricação de ônibus com sede na Europa. O estudo buscou determinar se a descrição em texto de atividades de manutenção estava relacionada à manutenção corretiva ou preventiva, com um objetivo de precisão de 95%.

O trabalho de Soares (2022) estruturou um plano de manutenção utilizando informações do FMEA para a construção de análise RAM com aplicação de um sistema especialista que utiliza consulta estruturada com SQL e linguagem de programação Python.

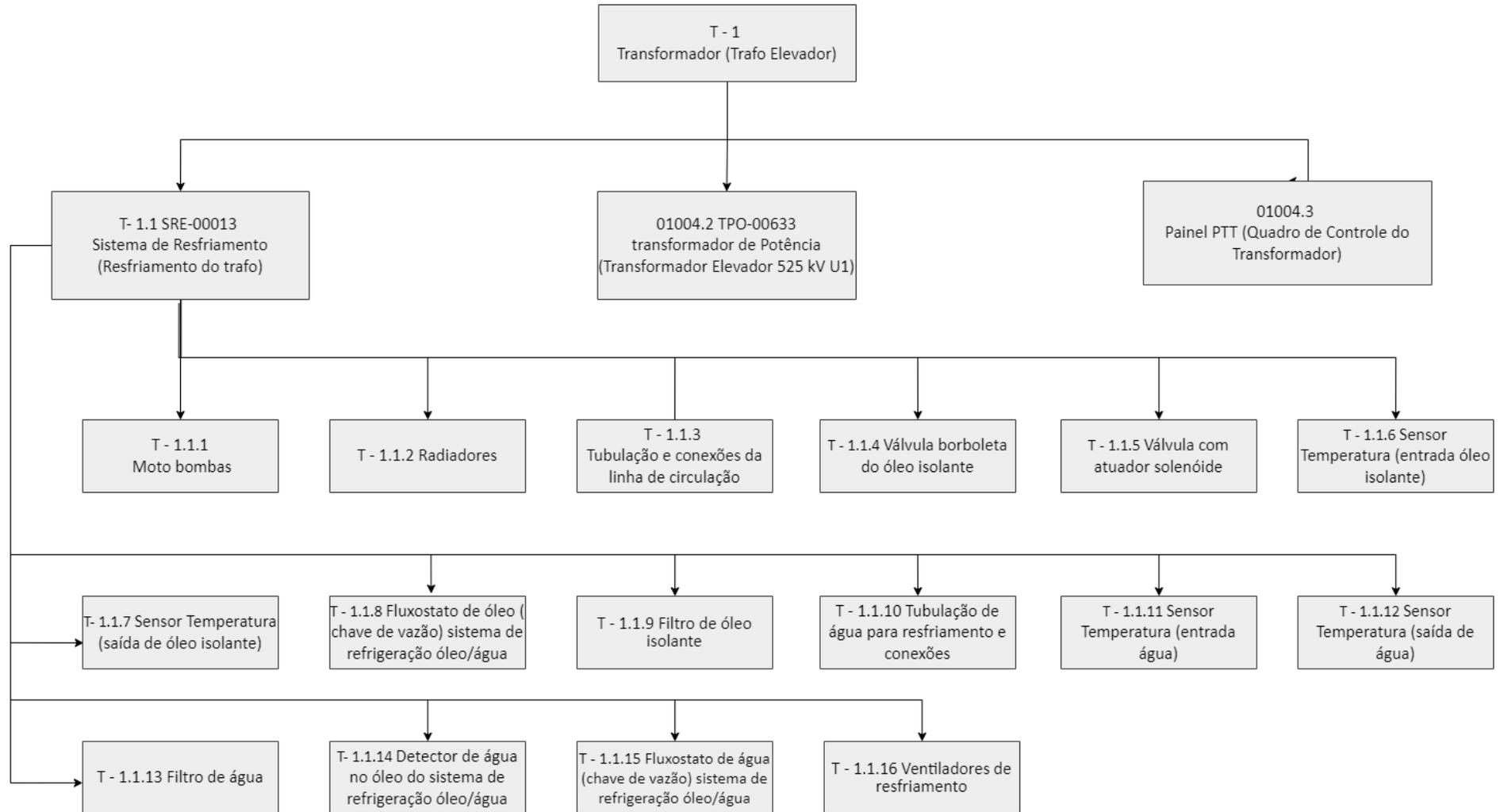
4. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA ESPECIALISTA E APLICAÇÃO EM SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA

Neste capítulo são apresentadas etapas de desenvolvimento do trabalho compreendendo: apresentação do sistema TRAF0 do hidrogerador tipo Francis referente ao estudo de caso de aplicação, base de dados utilizada (FMECA do TRAF0) e Etapas de desenvolvimento do Sistema Especialista: Processamento de linguagem natural (PLN), Cálculo da similaridade entre os termos, aplicação da linguagem de programação MySQL e Python e por final a Estrutura do plano de manutenção estruturado.

4.1 Estrutura do sistema do Trafo 525 Kv

O presente trabalho foi aplicado em um sistema do hidrogerador tipo Francis, o transformador de potência de 525 Kv. Os dados foram obtidos por manuais e referencial científico pesquisado. A Figura 8 representa a arquitetura de uma árvore funcional simplificada do Transformador em estudo, apontando seus principais subsistemas e componentes.

Figura 8 – Subsistemas do transformador de potência



Fonte: autoria própria (2023)

Os principais subsistemas o TRAFIO 525Kv apresentado na Figura 8 são: Moto Bombas, Radiadores, Tubulação e Conexões da linha de circulação, Válvula borboleta de óleo isolante, Válvula com atuador solenoide, Sensores de temperatura, Fluxostato de óleo, Filtro de óleo, Filtro de Água, Tubulações de passagem de água, Fluxostato de água, Detector de água e Ventiladores para resfriamento. O Quadro 2 apresenta a descrição funcional dos componentes que integram o sistema TRAFIO 525Kv.

Quadro 2 - Descrição funcional dos componentes do TRAFIO 525Kv

Sequência da Unidade	Subsistema	Descrição Funcional
T-1	Transformador	Elevar a tensão de saída do gerador para o valor da tensão de transmissão
T-1.1	SRE-0013 - Sistema de Resfriamento (Resfriamento do trafo)	Sistema óleo-água para resfriamento do transformador
T-1.1.1	Moto bombas	Bombas para auxílio na circulação do óleo
T-1.1.1.1	BOM-00198 Bomba (Bomba 1 de circulação de óleo do trafo)	Bomba tipo rotor afogado e auto lubrificantes para auxílio na circulação do óleo
T-1.1.1.2	BOM-00199 Bomba (Bomba 2 de circulação de óleo do trafo)	Bomba tipo rotor afogado e auto lubrificantes para auxílio na circulação do óleo
T-1.1.1.3	BOM-00200 Bomba (Bomba 3 de circulação de óleo do trafo)	Bomba tipo rotor afogado e auto lubrificantes para auxílio na circulação do óleo
T-1.1.1.4	BOM-00201 Bomba (Bomba 4 de circulação de óleo do trafo)	Bomba tipo rotor afogado e auto lubrificantes para auxílio na circulação do óleo
T-1.1.2	Radiadores	Utilizados para auxílio na refrigeração dos equipamentos
T-1.1.2.1	TCA-05111 Trocador de calor (Trocador de calor 1 do trafo)	Permitir a troca de calor entre o transformador e o ambiente

Sequência da Unidade	Subsistema	Descrição Funcional
T-1.1.2.1.1	Casco-tubo (feixes de tubo)	Promover a troca eficiente de calor do óleo
T-1.1.2.1.1.1	Aletas estanhadas	Promover troca de calor entre o ambiente e o equipamento com maior eficiência
T-1.1.2.1.2	Pressostato diferencial 63D-T1TEL	Supervisiona perda de carga no trocador de calor
T-1.1.2.2	TCA-05112 Trocador de calor (Trocador de calor 2 do trafo)	Permitir a troca de calor entre o transformador e o ambiente
T-1.1.2.2.1	Casco-tubo (feixes de tubo)	Promover a troca eficiente de calor do óleo

Fonte: manual do Trafo 525 Kv

4.2 Estruturação do banco de dados – FMECA

O banco de dados principal utilizada para desenvolvimento do plano de manutenção foi a tratativa de Falhas dos componentes do TRAF0 525Kv estruturada no formulário FMECA. O Quadro 3 mostra alguns modos de falhas padronizados na tratativa de falhas executada, contendo diversas causas-raízes e seu detalhamento.

Quadro 3 – Modelos de Modos de Falhas identificados na Tratativa de falhas do TRAF0 525Kv

Sigla	Descrição	Detalhamento
AB	Abalroamento/Colisão	Refere-se a choque de veículo com equipamento. Por exemplo: equipamento abalroado durante manobras no interior da subestação.
AC	Atuação Correta da Proteção Elétrica	Exclui-se o Defeito de Supervisão, Controle, Medição e Proteção, que tem classificação própria.

Sigla	Descrição	Detalhamento
AE	Atuação Indevida da Proteção Elétrica	Deve ser informado, quando ocorrer desligamento da unidade geradora devido à atuação incorreta das proteções: diferencial do gerador, perda de excitação, perda de sincronismo, falta terra-estator, sobretensão, etc. A grandeza monitorada é de natureza elétrica.
AF	Afrouxamento	Ato ou efeito de afrouxar (soltar, desatar, etc.). Refere-se às situações em que peças / componentes / acessórios são fixados através de parafusos, porcas, molas, amarrações, etc.
AI	Atuação Indevida da Proteção Não Elétrica	Este termo deve ser informado quando o desligamento do equipamento ocorrer por atuação incorreta de proteção que monitora grandeza não-elétrica.
AM	Ação do Meio Ambiente	Refere-se exclusivamente à agressividade devida a condições naturais. Exclui-se a Corrosão/Oxidação, que tem classificação própria. Inclui-se Enchente, transbordamento de rios.

Fonte: manual do TRAF0 525 Kv

A base completa de modos de falhas padronizados contém 102 linhas com falhas diferentes e seu detalhamento, esta foi utilizada pelo sistema especialista desenvolvido como meio de verificação da sua função de BUSCA.

Extraiu-se a base de dados com OSs (Ordens de manutenção) com a descrição de possíveis serviços de manutenção que poderiam ser executados ao longo do tempo como manutenção corretiva no sistema TRAF0 525. Com esta base de dados de OSs foi possível testar a funcionalidade de “Busca” do smart sytem, comparando a listagem de modos de falhas padronizadas com a descrição dos serviços realizados nas OSs, ou seja, verificar se sistema especialista desenvolvido verificar é capaz de identificar nas descrições de ordem de serviço qual é a provável falha no sistema, com o detalhamento e sigla padronizada do modo de falha. O Quadro 4 abaixo ilustra parte da base de dados de Ordens de Serviço estruturada.

Quadro 4 – Tabela de OS com representações de algumas descrições de OS

OS (no.)	Descrição da Ordem de Serviço (OS)	Ação Corretiva - Resolver a Descrição da OS	Causas do Modo de Falha - RCA (análise de causa raiz)	Ação Preventiva
108020	<i>Sanar vibração excessiva e o aumento de temperatura das bombas de circulação de óleo</i>	Troca da bomba	Oscilação de alta frequência no eixo ou carcaça da bomba, provocando desgaste e desalinhamento	(1) Monitoramento online da temperatura (2) Inspeção visual em campo
43971	<i>Resolver a deficiência no sistema de bombeamento dos fluidos</i>	Troca da bomba	Oscilação de alta frequência no eixo ou carcaça da bomba, provocando desgaste e desalinhamento	(1) Monitoramento online da frequência de rotação (análise de vibração) (2) Inspeção visual em campo
20168	<i>Eliminar variação de fluxo nas bombas do sistema de resfriamento</i>	(1) Troca da bomba (2) Eliminação de vazamentos (3) Troca dos elementos filtrantes (4) Troca da bomba	(1) Perda de potência (2) Vazamento (3) Entupimento dos elementos filtrantes (4) Cavitação	(1) Monitoramento da temperatura (2) Inspeção em campo/ verificação de vazamento

Fonte: Autoria própria (2023)

A base de dados completa de OSs possui no total 112 linhas, com descrições únicas de serviços realizados no TRAF0 525K (ANEXO A). Esta base de dados foi desenvolvida com auxílio de 3 especialistas doutores na área de engenharia de manutenção.

Posteriormente, empregou-se ao conjunto de dados a planilha que contém a análise FMECA do TRAF0 525KV como teste. O Quadro 5 exemplifica parte da tratativa de falhas FMECA do sistema de resfriamento do TRAF0.

Quadro 5 – Parte da análise FMECA do sistema de resfriamento do TRAFO (exemplificativa)

Id_Modo de Falha	Sigla Modo de Falha	Modo de Falha	Componente	Efeito no Equipamento	Efeito no Sistema	Severidade (S)	Causas do Modo de Falha	Ocorrência (O)	Sigla do Controle	Controles Atuais	Deteção (D)	RPN
1	VB	Vibração	Bomba BOM-00198, BOM-00199, BOM-00200 e BOM-00201 de Circulação de Óleo	Deficiência no sistema de bombeamento dos fluidos	Elevação de temperatura do transformador, causando a sua diminuição de potencial operacional e parada da unidade geradora	9	Oscilação de alta frequência no eixo ou carcaça da bomba, provocando desgaste e desalinhamento	2	OP1	Inspeção	3	54
2	FL	Fluxo/Vazão Anormal	Bomba BOM-00198, BOM-00199, BOM-00200 e BOM-00201 de Circulação de Óleo	Redução da pressão de saída e incapacidade de bombeamento	Elevação de temperatura do transformador, causando a sua diminuição de potencial operacional da unidade geradora	7	(1) Perda de potência (2) Vazamento (3) Entupimento dos elementos filtrantes (4) Cavitação	4	OP1	Inspeção	1	28
3	VZ	Vazamento	Bomba BOM-00198, BOM-00199, BOM-00200 e BOM-00201 de Circulação de Óleo	Perda de vedação e estanquidade, incapacidade de bombeamento	Elevação de temperatura do transformador, causando a sua diminuição de potencial operacional da unidade geradora	7	(1) Elementos de vedação danificados (2) Desgaste	5	OP1	Inspeção	1	35
4	FP	Falha Partida	Bomba BOM-00198, BOM-00199, BOM-00200 e BOM-00201 de Circulação de Óleo	Impossibilidade de partir, parar ou regular a velocidade e pressão do fluido bombeado	Elevação de temperatura do transformador, causando a parada da unidade geradora	9	(1) Defeito no sistema de automação (2) Erro de operação	1	COR	Manutenção corretiva	7	63

Fonte: autoria própria (2023)

A tratativa de falhas FMECA do sistema de resfriamento do transformador, possui no total 62 registros únicos para cada efeito em um equipamento relacionado a um componente. Esta base de dados contribuiu com o algoritmo para a obtenção de métricas em relação a ocorrência, severidade e detecção, além de poder classificar as ações pelo Número de Prioridade de Risco (RPN ou NPR).

Para armazenar as informações obtidas da base de dados OS (dados de teste e verificação de funcionamento do sistema especialista) e análise FMECA e assim permitir circulação de grande número de dados, foi criado um banco de dados usando linguagem SQL através do SGDB chamado MySQL, para unificar as bases de dados.

Para tanto, criou-se o banco de dados denominado de “plano_manutenção”, que armazena as tabelas “árvore_funcional”, “modo_falha”, “fmeca” e “ordem_servico”. A forma que a base de dados unificada foi estruturada está representado na Figura 09, utilizando a linguagem SQL. Para armazenar o resultado do programa e o plano de manutenção, também foi criado a tabela “plano”.

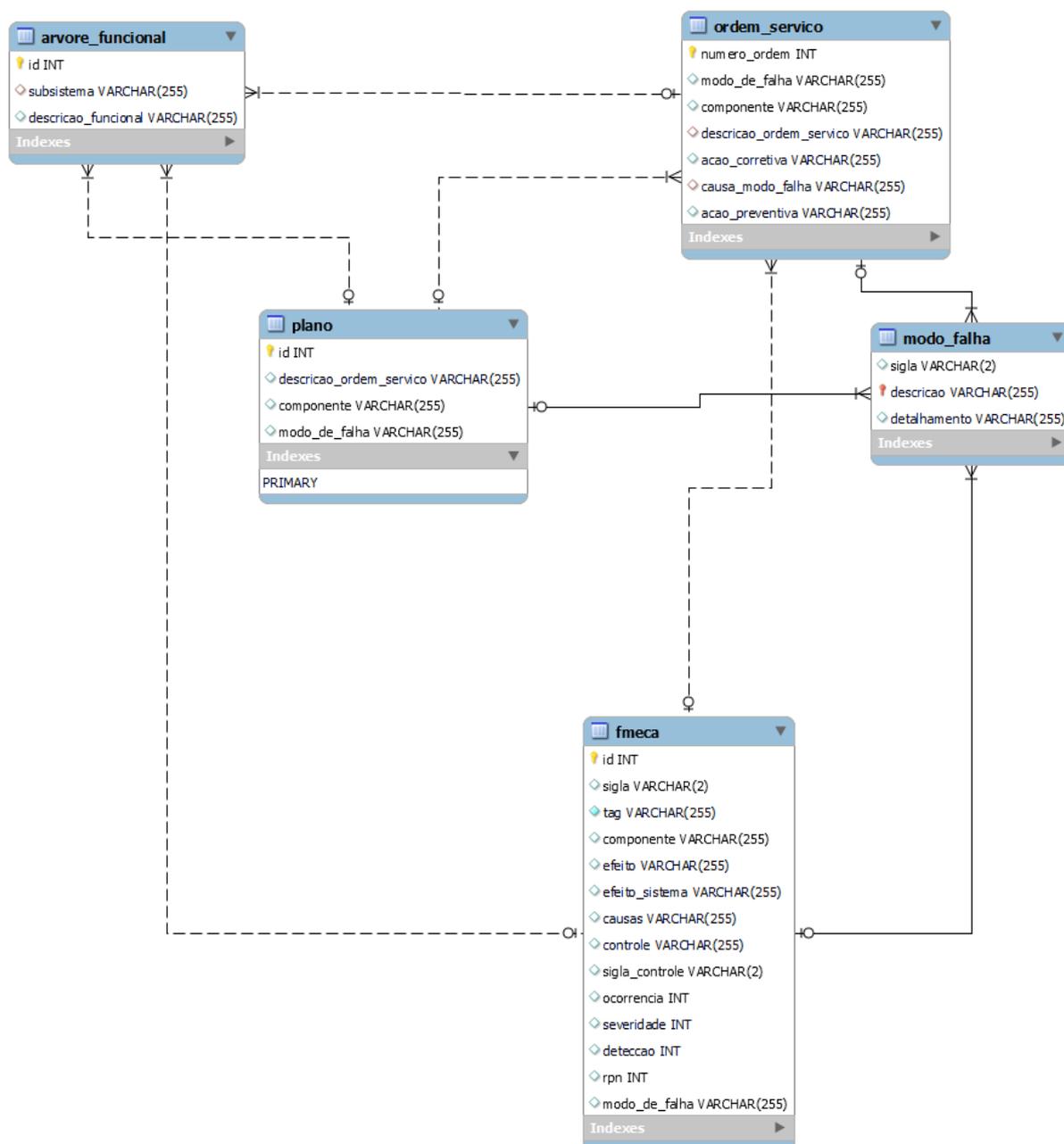
Figura 9 - Criação da tabela “arvore_funcional” no MySQL

```
1 ● create database plano_manutencao;
2 ● use plano_manutencao;
3
4 ● ☹ CREATE TABLE arvore_funcional (
5     id INT AUTO_INCREMENT,
6     tag VARCHAR(255) NOT NULL,
7     subsistema VARCHAR(255),
8     descricao_funcional VARCHAR(255),
9     PRIMARY KEY (id),
10    UNIQUE KEY unique_tag (tag)
11 ) CHARACTER SET utf8;
12
```

Fonte: Autoria própria (2023)

Posteriormente as bases de dados foram relacionadas para que as informações estejam referenciadas, como mostrado na Figura 10. É possível observar também que, para fins de facilidade e estética na apresentação de resultados, buscou-se centralizar a base do plano de manutenção, denominada “**plano**”. Esta estrutura será completada a partir da resposta do algoritmo.

Figura 10 – Relacionamento entre tabelas do banco de dados



Fonte: autoria própria (2023)

A partir do relacionamento, a base “**plano**” será formada pelas seguintes informações: identificador único, número da OS, descrição da OS, identificador do componente, nome do componente, modo de falha relacionado, RPN e a ação preventiva. A Figura 11 apresenta a estrutura do plano de manutenção que irá receber estas informações dentro da plataforma do sistema especialista desenvolvido.

Figura 11 – Tela inicial para construção do “Plano” no MySQL

```
36 ● ○ CREATE TABLE plano (  
37     id INT AUTO_INCREMENT Primary key,  
38     descricao_ordem_servico varchar (255),  
39     componente varchar(255),  
40     modo_de_falha varchar (255)  
41     );
```

<

Result Grid |  Filter Rows: | Edit:   

	id	descricao_ordem_servico	componente	modo_de_falha
•	NULL	NULL	NULL	NULL

Fonte: autoria própria (2023)

Após a criação do banco de dados com o armazenamento das informações dos arquivos disponibilizados e a plataforma “**plano**” preparada para receber as informações, é possível iniciar a etapa de tratamento dos dados com aplicação das técnicas de PLN (tokenização, remoção de stop words e lematização) por meio da linguagem de programação Python.

4.3 Tratamento de dados com Processamento de Linguagem Natural (PLN)

Para agilizar a consulta ao banco de dados com as informações da manutenção que deve ser praticada, desenvolveu-se um *Smart System* em linguagem Python através do Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE) chamado Jupyter Notebook.

O Jupyter Notebook é uma aplicação web de código aberto que permite criar e compartilhar documentos interativos contendo código executável, texto, visualizações e outros elementos. Com ele é possível escrever e executar códigos em Python, o que permitirá que o tratamento das Ordens de manutenção utilizando técnicas de PLN.

Sendo assim, o programa inicialmente deverá se conectar com o banco de dados instalado no computador usando as credenciais de usuário, login, senha e banco de dados. A Figura 12 estabelece o código usado para essa conexão.

Figura 12 – Código usado para conexão do Jupyter Notebook com o MySQL

```
!pip install mysql-connector-python

import mysql.connector

# Definir as informações de conexão
host = 'localhost'
user = 'root'
password = 'admin'
database = 'plano_manutencao'
# Conectar ao banco de dados
try:
    conn = mysql.connector.connect(
        host=host,
        database=database,
        user=user,
        password=password
    )
    print('Conexão bem-sucedida!')

    # Executar consultas ou operações no banco de dados

    # Fechar a conexão
    conn.close()
    print('Conexão fechada.')
except mysql.connector.Error as error:
    print(f'Falha na conexão: {error}')
```

Fonte: autoria própria (2023)

Para confirmação se a conexão foi bem-sucedida, ao executar o código a mensagem de confirmação da Figura 13 deve aparecer como resultado, caso contrário, é informado que houve uma falha durante conexão. Com a conexão estabelecida, o código pode prosseguir para a etapa de tratamento das informações.

Figura 13 – Mensagem de confirmação para conexão com o banco de dados

```
Requirement already satisfied: mysql-connector-python in c:\users\windows 10\anaconda3\lib\site-packages (8.0.33)
Requirement already satisfied: protobuf<=3.20.3,>=3.11.0 in c:\users\windows 10\anaconda3\lib\site-packages (from mysql-connect
or-python) (3.20.3)
Conexão bem-sucedida!
Conexão fechada.
```

Fonte: autoria própria (2023)

Posteriormente, tratamento inicia-se com a importação das funções usadas para o PLN, ciência de dados e inteligência artificial, representado respectivamente pelas bibliotecas de Kit de Ferramentas de Linguagem Natural (NLTK), pandas e *Sklearn*, como é mostrado pelo código das importações da Figura 14.

Figura 14 – Importação das bibliotecas usadas para tratamento dos dados

```
# Realizando a importação e download das bibliotecas
import nltk
import pandas as pd
from nltk.corpus import stopwords
from nltk.tokenize import word_tokenize
from nltk.stem import WordNetLemmatizer
from sklearn.feature_extraction.text import TfidfVectorizer
from sklearn.metrics.pairwise import cosine_similarity
```

Fonte: autoria própria (2023)

A biblioteca NLTK possui um conjunto de funções e módulos que oferecem suporte às funcionalidades de classificação, *tokenização*, lematização, marcação, análise e raciocínio semântico. Já a biblioteca pandas em particular oferece estruturas e operações para manipular tabelas numéricas e séries temporais. Por fim a biblioteca que realiza a aplicação de funções responsável pela operação de similaridade é a *Sklearn*.

A seguir, foi estabelecido uma função para aplicar nas colunas de descrição da OS buscando a *tokenização* das sentenças, retirada das palavras de parada (*stop_words*) em português e lematização das palavras. A Figura 15 mostra a

codificação realizada para a definição dessa função, denominada “processar_descricao”.

Figura 15 – Função processar_descricao com aplicação de PLN das descrições da OS

```
# Obter o conjunto de stopwords
stop_words = set(stopwords.words('portuguese'))

# Inicializar o Lemmatizador
lemmatizer = WordNetLemmatizer()

# Função para processar a descrição da ordem de serviço
def processar_descricao(descricao):
    # Tokenização
    tokens = word_tokenize(descricao.lower())

    # Remoção de stopwords e pontuação
    tokens_filtrados = [token for token in tokens if token.isalnum() and token not in stop_words]

    # Lemmatização
    tokens_lemmatized = [lemmatizer.lemmatize(token) for token in tokens_filtrados]

    return ' '.join(tokens_lemmatized)
```

Fonte: autoria própria (2023)

Determinando como exemplo a execução do código com a primeira frase da ordem de manutenção, descrita como “Sanar a vibração excessiva e o aumento de temperatura das bombas de circulação de óleo”, tem-se como resultado uma lista com as palavras individualmente segregadas, sendo ela **['sanar', 'vibração', 'excessiva', 'e', 'o', 'aumento', 'de', 'temperatura', 'das', 'bombas', 'de', 'circulação', 'de', 'óleo']**, como mostra a Figura 16.

Figura 16 – Lista com os resultados com a primeira frase tokenizada

```
['sanar', 'vibração', 'excessiva', 'e', 'o', 'aumento', 'de', 'temperatura', 'das', 'bombas', 'de', 'circulação', 'de', 'óleo']
```

Fonte: autoria própria (2023)

A partir desse momento, é retirado das frases as palavras que não possuem contribuição semântica, com objetivo de melhorar o relacionamento entre os termos. Essas palavras estão dentro do pacote **stop words** da biblioteca NLTK e a lista de termos e o resultado da frase **tokenizada** sem os mesmos são representadas a partir da Figura 17.

Figura 17 – Lista de palavras sem stop words

```
{'no', 'ser', 'houveremos', 'estas', 'te', 'estivera', 'das', 'do', 'tiveram', 'teve', 'tenham', 'isto', 'mais', 'haja', 'formos', 'ao', 'aquelas', 'às', 'estivermos', 'houverá', 'lhes', 'não', 'temos', 'houverão', 'houvéramos', 'ele', 'fôramos', 'dela', 's', 'os', 'houvessem', 'até', 'dos', 'tínhamos', 'era', 'houveria', 'houvermos', 'há', 'havemos', 'minha', 'numa', 'nossos', 'h', 'ajam', 'por', 'forem', 'houve', 'seria', 'fui', 'tivéssemos', 'estivessem', 'estavam', 'elas', 'tivera', 'estiver', 'com', 'pel', 'o', 'tereí', 'tivesse', 'aquele', 'e', 'como', 'fôssemos', 'estávamos', 'eram', 'você', 'tivermos', 'suas', 'um', 'nem', 'em', 'só', 'fora', 'estivemos', 'terão', 'tém', 'esses', 'houveriam', 'teríamos', 'serei', 'eles', 'tua', 'seus', 'as', 'tivessem', 'pelos', 'a', 'estou', 'fossem', 'dele', 'estejam', 'haver', 'nas', 'sejamos', 'vocês', 'sejam', 'pelas', 'estivesse', 'houverí', 'amos', 'teus', 'nós', 'depois', 'dela', 'me', 'sou', 'mesmo', 'tiverem', 'foram', 'estejamos', 'estiverem', 'seja', 'ou', 'éram', 'os', 'aos', 'teriam', 'estamos', 'tive', 'nossas', 'quando', 'seríamos', 'será', 'tenha', 'tinha', 'para', 'seriam', 'tiver', 'tenho', 'nossa', 'fomos', 'estão', 'vos', 'estivéramos', 'essas', 'mas', 'estive', 'entre', 'lhe', 'estava', 'nosso', 'eu', 'n', 'um', 'houver', 'estive', 'meus', 'uma', 'ela', 'somos', 'o', 'se', 'meu', 'hão', 'estivéssemos', 'qual', 'tinham', 'houvéssemos', 'tenhamos', 'estiveram', 'isso', 'de', 'terá', 'seremos', 'hajamos', 'nos', 'estes', 'estar', 'quem', 'está', 'houvera', 't', 'eremos', 'teu', 'teria', 'à', 'houverei', 'já', 'fosse', 'for', 'na', 'houveram', 'é', 'aqueles', 'sem', 'tuas', 'esteja', 'hou', 'vesse', 'aquela', 'aquilo', 'muito', 'esse', 'tivéramos', 'da', 'deles', 'pela', 'são', 'foi', 'serão', 'tu', 'este', 'sua', 'm', 'inhas', 'tem', 'houverem', 'esta', 'houvemos', 'seu', 'essa', 'tivemos', 'que', 'hei', 'também'}
```

```
['sanar', 'vibração', 'excessiva', 'aumento', 'temperatura', 'bombas', 'circulação', 'óleo']
```

Fonte: autoria própria (2023)

É importante reconhecer as palavras já presentes no pacote de **stop_words** para que sejam complementadas, caso identificado algum outro termo sem contribuição semântica e fora dessa lista. Nesse caso, os termos “e”, “o”, “de” e “das” foram retirados da frase original.

Continuando o processamento, a próxima etapa é utilizar a lista **['sanar', 'vibração', 'excessiva', 'aumento', 'temperatura', 'bombas', 'circulação', 'óleo']** já **tokenizada** e sem **stop words**, para a execução do último processo denominado de **lematização**. Nessa etapa os termos serão reduzidos no seu infinitivo para que a comparação com outros termos seja facilitada e o resultado é mostrado na Figura 18.

Figura 18 - Resultado com a lista de frases após lematização

```
['sanar', 'vibração', 'excessivo', 'aumento', 'temperatura', 'bomba', 'circulação', 'óleo']
```

Fonte: autoria própria (2023)

Após a última etapa de lematização, as descrições da OS estão prontas para que sejam comparadas com os componentes e os modos de falhas e ser relacionados com aqueles que, de acordo com as técnicas utilizadas, sejam considerados mais semelhantes.

4.3.1 Estabelecendo a Correspondência e Similaridade com IA

A aplicação da IA ocorre com o objetivo de encontrar o componente e o modo de falha relacionado a descrição da OS após o tratamento de PLN, conforme é mostrado na Figura 19.

Figura 19 - Código para cálculo da matriz tf-idf e similaridade do cosseno

```
# Aplicar a função de PLN nas descrições da ordem de serviço, criar matriz tf-idf e calculo da similaridade
componentes_relacionados = []
modos_falha_relacionados = []

for descricao in df_ordens_servico['Descrição da Ordem de Serviço (OS)']:
    descricao_processada = processar_descricao(descricao)

    #Calcular similaridade entre a descrição processada e os componentes
    componentes = df_componentes['Subsistema'].apply(processar_descricao)
    tfidf = TfidfVectorizer().fit_transform([descricao_processada] + list(componentes))

    similaridade_componentes = cosine_similarity(tfidf)[0, 1:]
    indice_componente_relacionado = similaridade_componentes.argmax()

    componente_relacionado = df_componentes.loc[indice_componente_relacionado, 'Subsistema']

    #Calcular similaridade entre a descrição processada e os modos de falha
    modos_falha = df_modos_falha['Descrição'].apply(processar_descricao)
    tfidf = TfidfVectorizer().fit_transform([descricao_processada] + list(modos_falha))

    similaridade_modos_falha = cosine_similarity(tfidf)[0, 1:]
    indice_modo_falha_relacionado = similaridade_modos_falha.argmax()

    modo_falha_relacionado = df_modos_falha.loc[indice_modo_falha_relacionado, 'Descrição']

    componentes_relacionados.append(componente_relacionado)
    modos_falha_relacionados.append(modo_falha_relacionado)
```

Fonte: autoria própria (2023)

Inicialmente é criado duas listas vazias que, após o processamento, receberão os resultados componente e modo de falha relacionado a descrição da OS. Essas listas foram denominadas respectivamente de “**componentes_relacionados**” e “**modos_falha_relacionados**”.

Após a criação das listas, o código continua em um loop usando o método “for” para percorrer os textos contidos na lista de componentes e realizar a aplicação do tratamento de PLN e posteriormente, criar a matriz tf-idf. Após aplicação do PLN com a função “**processar_descricao**” aplicada na variável componentes, as frases processadas são concatenadas em uma lista e com o objeto e o cálculo da matriz TF-IDF é iniciado com o objeto **TfidfVectorizer()**. A função **fit_transform()** recebe a lista de frases processadas e retorna a matriz TF-IDF resultante, representada através da Figura 20.

Figura 20 – Resultado do algoritmo após a criação da matriz TF-IDF dos componentes

```

for descricao in df_ordens_servico['Descrição da Ordem de Serviço (OS)']:
    descricao_processada = processar_descricao(descricao)

    #Calcular similaridade entre a descrição processada e os componentes
    componentes = df_componentes['Subsistema'].apply(processar_descricao)
    tfidf = TfidfVectorizer().fit_transform([descricao_processada] + list(componentes))

print(tfidf)

```

(0, 72)	0.3253354054496083
(0, 245)	0.39343444296082497
(0, 181)	0.39343444296082497
(0, 112)	0.39343444296082497
(0, 256)	0.3157801574005786
(0, 271)	0.19907639651513512
(0, 262)	0.3683011144050137
(0, 213)	0.39343444296082497
(1, 250)	1.0
(2, 247)	0.3566312107386424
(2, 207)	0.8686870337664219
(2, 223)	0.3437979303212649
(3, 37)	0.6834040238179168
(3, 170)	0.7300403689039945
(4, 58)	0.38426781091131135
(4, 36)	0.8131037022724021
(4, 247)	0.35960017801527433
(4, 271)	0.24877365378939265
(5, 58)	0.38426781091131135
(5, 36)	0.8131037022724021
(5, 247)	0.35960017801527433
(5, 271)	0.24877365378939265
(6, 58)	0.38426781091131135
(6, 36)	0.8131037022724021
(6, 247)	0.35960017801527433

Fonte: autoria própria (2023)

O resultado impresso ao executar “**print(tfidf)**” é uma representação da matriz TF-IDF resultante. Os valores entre parênteses representam as coordenadas (linha, coluna) e o valor associado a cada célula da matriz. A tupla (i, j) valor representa a célula da matriz TF-IDF na linha “i” e coluna “j” com o “**valor**”

Por exemplo, na linha 0 e coluna 72, o valor é 0.3253354054496083. Isso significa que a célula na posição (0, 72) da matriz TF-IDF possui um valor de 0.3253354054496083.

Essa representação é usada para mostrar a matriz TF-IDF resultante de forma compacta, exibindo apenas as células com valores diferentes de zero. Neste caso, a matriz possui muitas células com valor zero, pois a maioria dos termos não aparece na descrição processada. A matriz é representada como uma estrutura esparsa para economizar espaço de armazenamento. Cada linha da matriz TF-IDF representa um documento, enquanto cada coluna representa um termo do vocabulário utilizado para calcular a similaridade entre os documentos.

Posteriormente, o algoritmo realizará o cálculo de similaridade usando a matriz TF-IDF criada com a similaridade do cosseno a fim de determinar o melhor componente para a descrição da OS. Para tal, é necessário aplicar o algoritmo da Figura 21.

Figura 21 – Resultado do algoritmo após a etapa de similaridade por cosseno dos componentes

```

componentes_relacionados = []
modos_falha_relacionados = []

for descricao in df_ordens_servico['Descrição da Ordem de Serviço (OS)']:
    descricao_processada = processar_descricao(descricao)

    # Calcular similaridade entre a descrição processada e os componentes
    componentes = df_componentes['Subsistema'].apply(processar_descricao)
    tfidf = TfidfVectorizer().fit_transform([descricao_processada] + list(componentes))

    similaridade_componentes = cosine_similarity(tfidf)[0, 1:]
    indice_componente_relacionado = similaridade_componentes.argmax()

    componente_relacionado = df_componentes.loc[indice_componente_relacionado, 'Subsistema']
    componentes_relacionados.append(componente_relacionado)

print("Componente relacionado com a primeira descrição da OS: ", componentes_relacionados[0])
print("\n matriz de similaridade: \n", similaridade_componentes)

Componente relacionado com a primeira descrição da OS: Moto bombas

matriz de similaridade:
[0.         0.         0.         0.04952496 0.04952496 0.04952496
 0.04952496 0.         0.         0.         0.         0.
 0.         0.         0.         0.         0.         0.
 0.         0.         0.         0.         0.         0.
 0.17500168 0.06688334 0.         0.06289616 0.06478047 0.05170777
 0.08467145 0.15667674 0.         0.         0.         0.05694152
 0.         0.         0.         0.         0.         0.
 0.         0.         0.         0.         0.         0.
 0.         0.         0.         0.         0.09200832 0.

```

Fonte: autoria própria (2023)

Para a execução é utilizado a função “**cosine_similarity**” da biblioteca com operações inteligência artificial chamada scikit-learn para calcular a similaridade do cosseno entre a primeira linha da matriz TF-IDF (tfidf[0]) e todas as outras linhas (tfidf[1:]). O resultado é uma matriz de similaridade, mas como estamos interessados apenas na primeira linha (que corresponde à descrição processada) em relação aos componentes, selecionamos a primeira linha ([0]) e todas as colunas a partir da segunda ([1:]), excluindo a primeira coluna que representa a própria descrição processada.

Em seguida é utilizado o método “**argmax()**” para encontrar o índice do componente com a maior similaridade em relação à descrição processada. Esse índice corresponde à posição na matriz “**similaridade_componentes**” onde o valor máximo é encontrado.

Para fins de exemplificação, o código mostra através do “**printf(componentes_relacionados[0])**” que o componente encontrado para a lista lematizada “[‘sanar’, ‘vibração’, ‘excessivo’, ‘aumento’, ‘temperatura’, ‘bomba’, ‘circulação’, ‘óleo’]” a correspondência de componente para “Moto Bombas”. O que no contexto semântico e gramatical faz-se uma relação de correspondência positiva.

O algoritmo segue posteriormente realizando a criação da matriz TF-IDF e o cálculo da similaridade por cosseno para o modo de falha e assim consegue segregar a falha que mais se assemelha para cada uma das descrições da OS presentes no documento.

4.4 CONSTITUIÇÃO DO PLANO DE MANUTENÇÃO

A partir da obtenção dos componentes e falhas relacionadas a cada uma das descrições das OS, o algoritmo já é capaz de gerar um plano contendo esses três elementos correlacionados, a partir das entradas realizadas na Figura 22.

Figura 22 – Criação da tabela com descrição da OS, componente e modo de falha correlacionado

```

componentes_relacionados.append(componente_relacionado)
modos_falha_relacionados.append(modo_falha_relacionado)

# Salvar resultados em um Dataframe
df_resultado = pd.DataFrame({
    'Descrição da Ordem de Serviço (OS)': df_ordens_servico['Descrição da Ordem de Serviço (OS)'],
    'Componente': componentes_relacionados,
    'Modo de Falha': modos_falha_relacionados
})

# Exportar dataframe para um arquivo Excel
df_resultado.to_excel('resultados_ordem_servico.xlsx', index=False)

```

Fonte: autoria própria (2023)

Nessa etapa do código, as listas “**componentes_relacionados**” e “**modos_falha_relacionados**” anteriormente criadas são preenchidas com os componentes e modos de falha encontrados após a obtenção da similaridade. A cada

iteração do loop, um componente relacionado e um modo de falha relacionado são obtidos e adicionados às respectivas listas utilizando os comandos **“componentes_relacionados.append(componente_relacionado)”** e **“modos_falha_relacionados.append(modo_falha_relacionado)”**. Essas ações são executadas para todas as ordens de serviço presentes no dataframe **“df_ordens_servico”**.

Em seguida, um novo dataframe chamado **“df_resultado”** é criado utilizando as três listas preenchidas anteriormente. As colunas do dataframe são nomeadas como "Descrição da Ordem de Serviço (OS)", "Componente" e "Modo de Falha", e os valores correspondentes são extraídos das listas **“componentes_relacionados”** e **“modos_falha_relacionados”**.

Por fim, o dataframe **“df_resultado”** é exportado para um arquivo xls com o nome **“resultados_ordem_servico.xlsx”** e o seu resultado pode ser visualizado no Quadro 06 abaixo, onde cada linha representa uma ordem de serviço, contendo a descrição da ordem de serviço, o componente relacionado e o modo de falha relacionado.

Quadro 06 – Estrutura de Banco de Dados (em xls) gerada pelo Tratamento de PLN e Similaridade

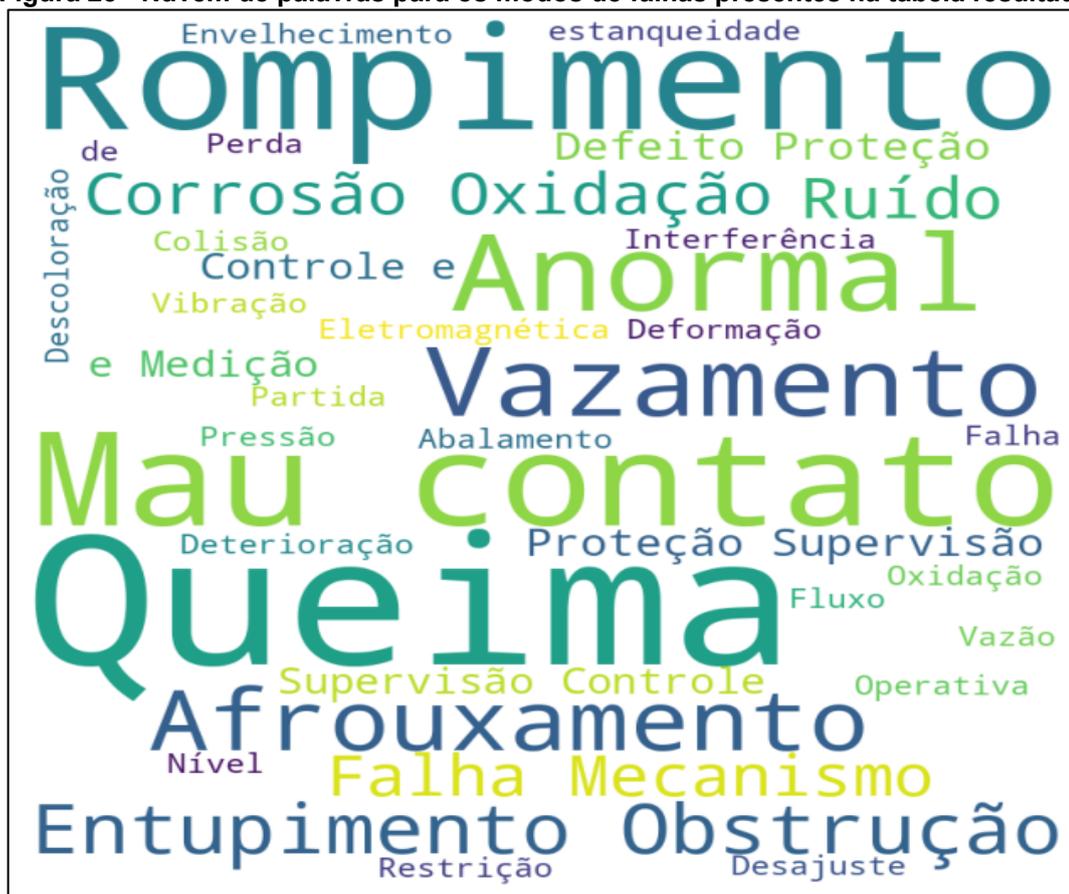
Descrição da Ordem de Serviço (OS)	Componente	Modo de Falha
Sanar vibração excessiva e o aumento de temperatura das bombas de circulação de óleo	Moto bombas	Vibração
Resolver a deficiência no sistema de bombeamento dos fluídos	Moto bombas	Vibração
Eliminar variação de fluxo nas bombas do sistema de resfriamento	Moto bombas	Fluxo/Vazão Anormal
Sanar baixa pressão no sistema de bombeamento	Moto bombas	Pressão Anormal
Corrigir vazamento encontrado nas bombas de circulação de óleo	Moto bombas	Vazamento
Eliminar vazamento encontrado próximo aos elementos de vedação nas bombas de circulação de óleo	Moto bombas	Vazamento

Consertar falha na partida e corrigir aumento de temperatura do sistema de bombas de circulação de óleo	Moto bombas	Falha de Partida
Consertar falha na partida do sistema de bombas de circulação de óleo	Moto bombas	Falha de Partida
Realizar a lubrificação do sistema de bombeamento de circulação de óleo, devido a presença de ruídos elevados.	Sistema de pressurização de óleo	Lubrificação Inadequada
Verificar alinhamento dos componentes das bombas de circulação de óleo	Moto bombas	Ruído anormal

Fonte: Autoria própria (2023)

A interpretação qualitativa dos dados é tão significativa quanto a análise quantitativa em estudos de manutenção e confiabilidade. Neste contexto, as nuvens de palavras (**word cloud**) emergem como uma ferramenta poderosa para visualizar a frequência e a importância relativa de diferentes termos dentro de um conjunto de dados. A Figura 23 apresenta a nuvem de palavras gerada a partir dos modos de falha registrados na tabela de resultado.

Figura 23 - Nuvem de palavras para os modos de falhas presentes na tabela resultado



Fonte: Autoria própria (2023)

Através da nuvem de palavras gerada pelo Smart system (Figura 23 acima), observa-se que termos como "Queima", "Rompimento" e "Mau contato" dominam a visualização, indicando que esses são os modos de falha mais frequentes. Isso corrobora com os achados quantitativos previamente discutidos, reforçando a necessidade de ações focadas na prevenção e correção desses tipos específicos de falha. Isto facilita a construção da rota preventiva de manutenção com otimização e alocação assertiva dos recursos humano e materiais no planejamento e execução das atividades.

Prosseguindo com a análise qualitativa dos dados coletados, a Figura 24 ilustra a nuvem de palavras gerada a partir das ocorrências dos componentes relatados nos registros de manutenção. Esta representação visual enfatiza os componentes mais citados, oferecendo uma perspectiva imediata sobre os elementos que mais frequentemente requerem atenção no contexto operacional avaliado.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o objetivo de tornar o plano de manutenção mais robusto, houve a implementação de outras informações contidas no banco de dados das outras tabelas no arquivo **"resultados_ordem_servico.xlsx"**

Informações essas que são a TAG do componente relacionado, obtido através do banco de dados da árvore funcional, o número da OS e ação preventiva obtido a partir do banco de dados das descrições da OS e por fim o RPN obtido através do FMECA, usando a descrição da OS como termo de busca. Sendo assim, implementou-se essa etapa no código que pode ser verificado a partir da Figura 25.

Figura 25- Criação da tabela com descrição da OS, componente e modo de falha correlacionado

```
df_resultado = pd.DataFrame({
    'Descrição da Ordem de Serviço (OS)': df_ordens_servico['Descrição da Ordem de Serviço (OS)'],
    'Componente': componentes_relacionados,
    'Modo de Falha': modos_falha_relacionados
})

# Remover duplicatas do dataframe df_fmeca
df_fmeca_unique = df_fmeca.drop_duplicates(subset='Descrição da Ordem de Serviço (OS)')

# Mapear os dados de RPN usando a descrição da ordem de serviço como referência
df_resultado['RPN'] = df_resultado['Descrição da Ordem de Serviço (OS)'].map(
    (df_fmeca_unique.set_index('Descrição da Ordem de Serviço (OS)')['RPN'])

# Criar um novo DataFrame com valores exclusivos na coluna "Subsistema" de df_componentes
df_componentes_unique = df_componentes.drop_duplicates(subset='Subsistema')

# Localizar o componente relacionado no df_componentes_unique e adicionar a tag
df_resultado['Tag do Componente'] = df_resultado['Componente'].map(df_componentes_unique.set_index('Subsistema')['TAG'])

# Adicionar o número da OS à planilha
df_resultado['Número da OS'] = df_ordens_servico['OS (no.)']

# Exportar dataframe para um arquivo Excel
df_resultado.to_excel('resultados_ordem_servico.xlsx', index=False)
```

Fonte: A autoria própria (2023)

Nesta etapa do código, é realizada a preparação e organização dos resultados obtidos para posterior análise e compartilhamento. Primeiramente, um novo data frame chamado **"df_resultado"** é criado, contendo as informações relevantes para cada ordem de serviço, como a descrição, o componente relacionado e o modo de falha associado.

Em seguida, são realizadas algumas etapas de pré-processamento nos dados. O dataframe **"df_fmeca"** é filtrado para remover duplicatas, resultando em um novo data frame chamado **"df_fmeca_unique"**. Esse processo garante que cada ordem de serviço seja representada apenas uma vez no conjunto de dados.

Os dados de RPN são mapeados no dataframe “**df_resultado**” usando a descrição da ordem de serviço como referência. Essa informação é importante para avaliar a prioridade e o risco associados a cada ordem de serviço.

Além disso, é criado um outro data frame chamado “**df_componentes_unique**”, que contém os componentes exclusivos presentes no data frame “**df_componentes**”. Isso é feito para evitar duplicações e facilitar a associação correta dos componentes às ordens de serviço.

No dataframe “**df_resultado**”, é adicionada uma coluna chamada 'Tag do Componente', que mapeia os componentes relacionados com as tags correspondentes em **df_componentes_unique**. Essa coluna auxilia na identificação e classificação dos componentes.

Por fim, a coluna 'Número da OS' é adicionada a **df_resultado**, recebendo os valores correspondentes aos números de ordem de serviço presentes no **DataFrame df_ordens_servico**. Dessa forma, cada ordem de serviço é devidamente identificada nos resultados.

Após todas essas etapas de processamento e organização, o **DataFrame df_resultado** é exportado para um arquivo xls denominado '**resultados_ordem_servico.xlsx**' apresentado no Quadro 07, permitindo a visualização e análise dos resultados de forma conveniente e compartilhável.

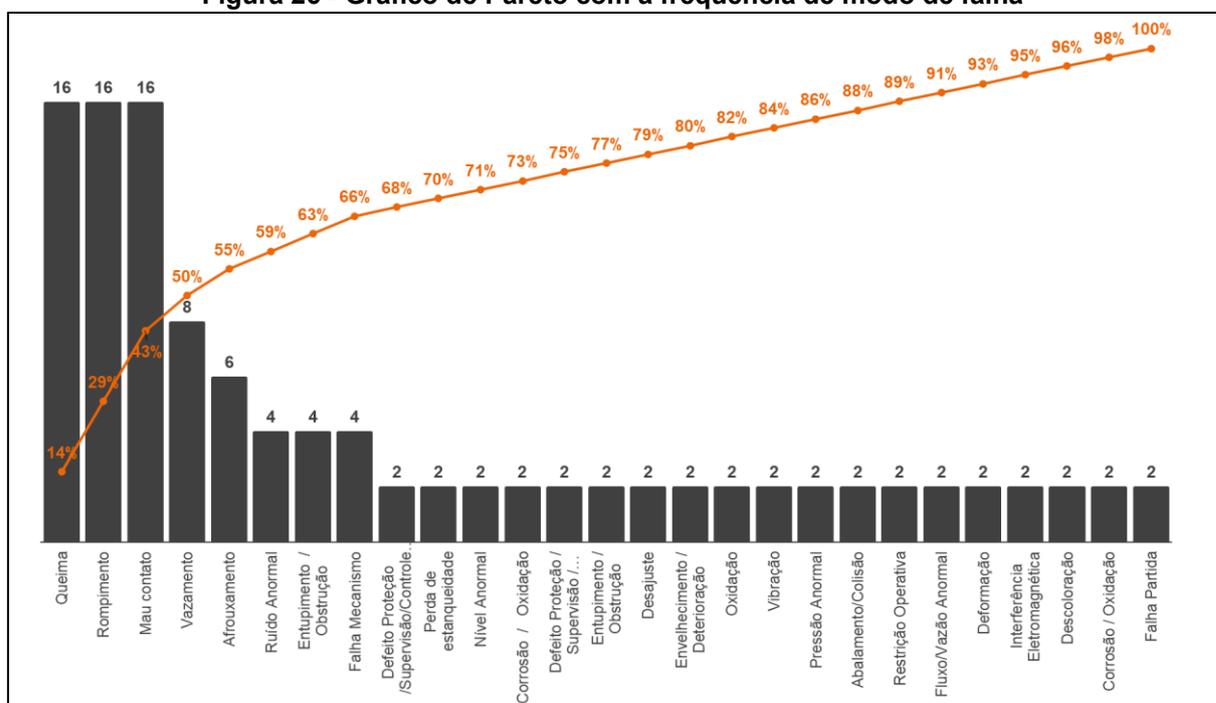
Quadro 07 – Tarefas do Plano de Manutenção gerado pelo cruzamento da Database automatizado pelo sistema especialista desenvolvido

Nº OS	Descrição da OS	TAG	Componente	Modo de Falha	RPN	Ação Preventiva
20303	Sanar vibração excessiva e o aumento de temperatura das bombas de circulação de óleo	T-1.1.1	Moto bombas	Vibração	54	(1) Monitoramento online da temperatura (2) Inspeção visual em campo
46784	Resolver a deficiência no sistema de bombeamento dos fluídos	T-1.1.1	Moto bombas	Vibração	28	(1) Monitoramento online da frequência de rotação (análise de vibração) (2) Inspeção visual em campo
52078	Eliminar variação de fluxo nas bombas do sistema de resfriamento	T.1.1.1	Moto bombas	Fluxo ou Vazão anormal	35	(1) Monitoramento da temperatura (2) Inspeção em campo/ verificação de vazamento
65712	Sanar baixa pressão no sistema de bombeamento	T.1.1.1	Moto bombas	Fluxo ou Vazão anormal	63	(1) Monitoramento da pressão (2) Inspeção em campo
95048	Corrigir vazamento encontrado nas bombas de circulação de óleo	T.1.1.1	Moto bombas	Vazamento	210	(1) Monitoramento da temperatura (2) Inspeção em campo / verificação de vazamento
60355	Eliminar vazamento encontrado próximo aos elementos de vedação nas bombas de circulação de óleo	T.1.1.1	Moto bombas	Vazamento	63	Inspeção visual

Fonte: Autoria própria (2023)

Nesta etapa, emprega-se o gráfico de Pareto para analisar a frequência de diferentes modos de falha, com o objetivo de determinar quais exigem atenção imediata e recursos de gestão. Esta ferramenta de qualidade, fundamentada no princípio de Pareto, também conhecido como regra 80/20, é utilizada para ilustrar que a maior parte dos problemas (80%) é frequentemente criada por um número pequeno de causas (20%). Portanto, a priorização efetiva dos modos de falha é crucial para otimizar os esforços de manutenção e melhorar a confiabilidade dos equipamentos. A Figura 26 exibe o gráfico de Pareto do modo de falha construído a partir dos plano de manutenção gerado.

Figura 26 - Gráfico de Pareto com a frequência de modo de falha

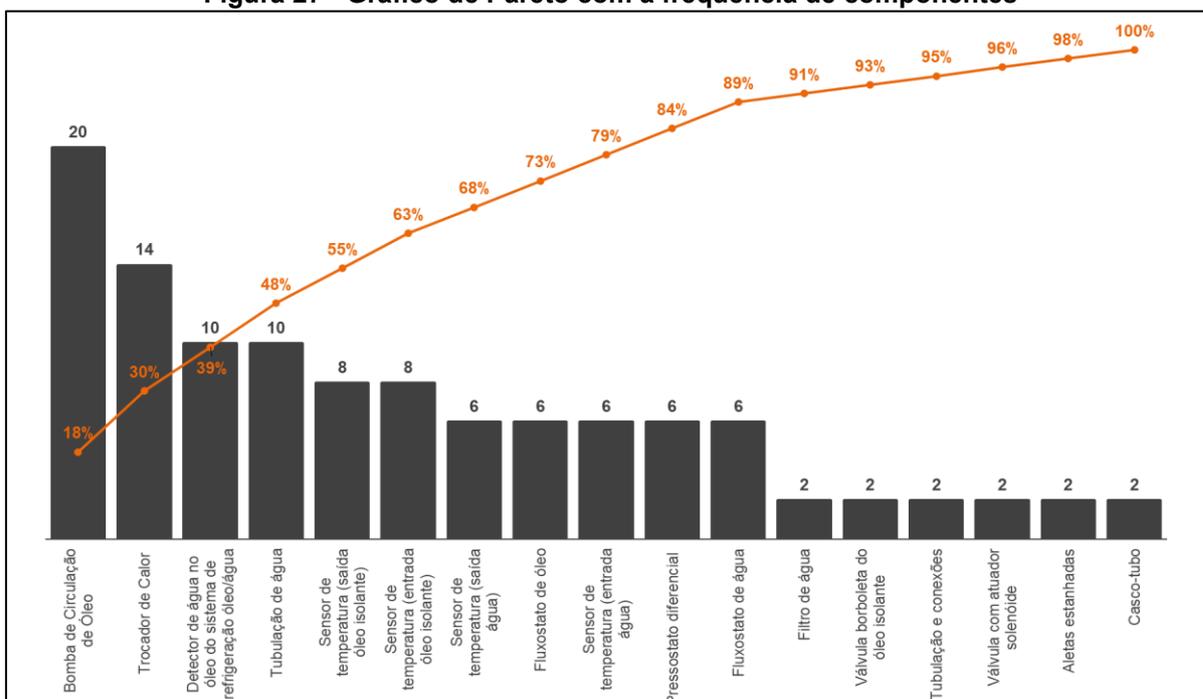


Fonte: Autoria própria (2023)

Observa-se que as falhas categorizadas como "Queima", "Rompimento" e "Mau contato" representam cada uma, 16 ocorrências, totalizando um expressivo percentual das falhas totais. Esta concentração indica que tais modos de falha são os mais críticos e devem ser o foco das ações corretivas e preventivas. Por outro lado, modos de falha como "Vazamento", "Afrouxamento", entre outros, apresentam frequências menores, sugerindo que, embora ainda importantes, podem ser priorizados em um segundo momento.

Complementando a análise anterior sobre modos de falha, é crucial examinar a frequência dos componentes envolvidos nos registros de manutenção, visando uma visão holística da gestão de ativos. O gráfico de Pareto para componentes ilustra a distribuição de frequências e facilita a identificação dos itens que exigem maior atenção.

Figura 27 - Gráfico de Pareto com a frequência de componentes



Fonte: Autoria própria (2023)

Observa-se que a 'Bomba de Circulação de Óleo' lidera o ranking com 20 ocorrências, seguida pelo 'Trocador de Calor' com 14 e pelo 'Detector de água no óleo' e 'Tubulação de água', cada um com 10 registros na Figura 27. Esses componentes constituem os pontos críticos na operação e representam áreas que potencialmente beneficiarão mais de intervenções de manutenção corretiva e preventiva.

A análise detalhada do Pareto permite a alocação eficiente de recursos, focando na resolução das falhas mais frequentes e, conseqüentemente, na mitigação dos impactos mais significativos na produção. As ações resultantes desta análise deverão ser direcionadas para a revisão de processos, treinamento de pessoal e investimento em equipamentos ou tecnologias de prevenção e detecção de falhas, especialmente para os modos de falha identificados como mais frequentes.

Como é possível observar, a eficiência e rapidez proporcionadas pela automação no processo de desenvolvimento de planos preventivos de manutenção é fundamental em um cenário onde a gestão de grandes volumes de dados de ordens

de serviço, gerando ações preventivas mais assertivas para proporcionar um melhor desempenho operacional dos ativos industriais.

A capacidade da IA em analisar o conteúdo textual das ordens de serviço não apenas acelera o processo, mas também extrai informações detalhadas para a composição do plano, facilitando a construção do plano com ações efetivas e priorizadas, de forma rápida e ágil para o planejamento de manutenção.

Assim, a aplicação de sistema especialista com tecnologias da i4.0 na digitalização e gerenciamento de tarefas de manutenção é muito mais assertiva e rápida em comparação aos métodos tradicionais de criação de planos de manutenção, o qual se fundamenta basicamente na experiência do planejador e dados históricos precários existentes na base de dados da manutenção.

A identificação de padrões e tendências ao longo do tempo, aliada à capacidade de adaptação dinâmica, confere uma vantagem significativa aos planos de manutenção automatizados. A previsão de falhas potenciais com base em dados históricos contribui não apenas para a redução de custos associados a paradas não planejadas, mas também para a otimização do ciclo de vida dos equipamentos.

A integração da automação com sistemas de monitoramento e diversos banco de dados em tempo real representa um avanço crucial para a abordagem proativa à manutenção, permitindo a identificação imediata de problemas e a implementação de ações corretivas antes que estes afetem a operação da unidade. Esta abordagem não só melhora a confiabilidade da unidade hidrogeradora, mas também otimiza sua disponibilidade operacional.

Em última análise, a automação da geração de planos de manutenção com o uso de PLN e IA não apenas representa uma evolução tecnológica, mas uma revolução na forma como se encara a manutenção industrial. Os benefícios tangíveis, como a redução de custos, a eficiência aprimorada e a melhoria na confiabilidade dos equipamentos, posicionam esta abordagem como uma estratégia indispensável para as operações bem-sucedidas de unidades.

Salienta-se que este Sistema especialista desenvolvido e apresentado neste trabalho de conclusão de curso foi desenvolvido durante a participação do autor no programa de iniciação científica IC UTFPR Ciclo 2021-2022 sob a orientação da Profa Marjorie Bellinello (orientadora do TCC), e que há pretensão de registro deste Smart system junto a UTFPR para preservar a autoria e direitos dos participantes do desenvolvimento do produto gerado pela pesquisa.

6. CONCLUSÕES

O sistema especialista fundamentado em um algoritmo desenvolvido em Python, revelou-se capaz de realizar a leitura e interpretação de 112 ordens de manutenção de forma ágil e precisa. A implementação do PNL aliada à IA e à aplicação do método TF-IDF e similaridade por cosseno, permitiu a identificação de componentes específicos e seus modos de falha associados nos textos das ordens de serviço.

A partir dessas análises, automatizou-se a criação de planos de manutenção preventiva, incluindo detalhes cruciais como a descrição da OS, o componente envolvido e o modo de falha associado. A integração desses dados com outras informações disponíveis no banco de dados proporcionou uma visão abrangente e interconectada, enriquecendo a compreensão do contexto de manutenção na Unidade Hidrogeradora.

O destaque dessa abordagem reside não apenas na eficiência operacional alcançada, mas também no fato de que todo esse processo foi concebido com um custo de implementação reduzido. A utilização de recursos de código aberto, como Python, e a aplicação de técnicas avançadas de processamento de linguagem natural permitiram criar uma solução acessível sem comprometer a qualidade e a precisão das análises realizadas.

Ao concluir este trabalho, pode-se afirmar que é possível desenvolver e implementar um sistema especialista de manutenção para digitalizar e automatizar processos na gestão de manutenção de ativos industriais, tornando a gestão industrial eficiente, economicamente viável e capaz de otimizar os processos de identificação de falhas e elaboração de planos de manutenção.

Esta pesquisa não apenas respondeu à pergunta central do problema, mas também abriu perspectivas promissoras para futuros avanços na integração de tecnologias inteligentes na gestão eficaz de sistemas de energia complexos.

Como principal resultado, o desenvolvimento do Smart System utilizando o algoritmo PLN integrado ao banco de dados FMECA e OS auxilia no desenvolvimento de um plano de manutenção consistente, que visa antecipar falhas e eliminar suas causas.

Assim, é possível determinar e priorizar de forma assertiva as ações de manutenção, garantindo disponibilidade e confiabilidade operacional ao processo de geração de energia. Além disso, possibilita uma melhor tomada de decisão no

planejamento da manutenção, direcionando peças, recursos materiais, humanos e financeiros para executar as ações de manutenção exatas que mitigam os modos de falhas crônicas

6.1 RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como proposta de melhoria e avanço de aplicação de tecnologias da Industria 4.0, propõe-se para trabalhos futuros:

- A ampliação do plano de manutenção para todos os elementos presentes no ativo Industrial.
- Analisar a eficácia do modelo e o levantamento de métricas avaliativas.
- Utilizar outras técnicas de PLN e similaridade entre textos e comparar com o modelo do presente trabalho, a fim de garantir um plano mais otimizado.
- Definir a periodicidade de manutenção para cada ação preventiva/preditiva levantada.
- Fazer análise dos índices de manutenção e de produção para comprovar se as medidas propostas são eficazes.
- Aplicar conceitos de Redes Neurais e Aprendizagem Profunda para a obtenção de melhores resultados, visando a prognose.

Destaca-se que parte deste trabalho foi desenvolvido durante o programa de Iniciação de Científica realizado no Ciclo 2021-2022 IC UTFPR e já foi publicado no Congresso Internacional “ 3rd IOM - *South American International Industrial Engineering and Operations Management Conference*” que aconteceu na cidade Assunção (Paraguai) entre os dias 19 e 21 de Julho de 2021, com o título *The Natural Language Processing (NLP) Algorithm Integrated with FMECA Analysis Applied in the Maintenance Plans Development to Power Generation System Assets*. O referido artigo pode ser acessado pelo link: <https://ieomsociety.org/proceedings/2022paraguay/34.pdf>, e está disponível no APÊNDICE 1 deste trabalho.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Sistema de Informações de Geração de 2021**. Brasília: Aneel, 2022. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/siga>. Acesso em: 30 abr. 2021. Acesso em: 10 jan. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5462. **Confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

ALMEIDA, P. S. D. **Manutenção Mecânica Industrial – Princípios Técnicos e Operações**. São Paulo: Editora Saraiva, 2016.

ASSIS, K. M. et al. **Princípios da elaboração de um plano de manutenção industrial**. *Exatas & Engenharias*, v. 5, n. 13, 2015.

BAEZA-YATES, R.; RIBEIRO-NETO, B. **Modern Information Retrieval: The Concepts and Technology Behind Search**. 2. ed. New York: Addison Wesley, 2011.

BARBOSA, R. E.; GASPAROTO, A. M. S. **Desenvolvimento de um software para gerenciamento da manutenção de acordo com o método TPM**. Simpósio de Tecnologia da Fatec Taquaritinga. 2015. Pag. 1 -10.

BELINELLI, M.; SOUZA, G.; PORTUGAL, E.; KAMINSKI, E. **Application of Quality Tools for Failure Analysis in Mechanical Systems of Industrial Bench Drill Presses - A Case Study in a Farm Harvester Factory**. Anais da Conferência Internacional de Engenharia Industrial e Gestão de Operações de 2012, p. 1391-1400, Turquia, 2012.

BLANCHARD, B. **Logistics Engineering & Management**. Prentice Hal: 6 ed. 2003.

BEEL, J. et al. **Research-paper recommender systems: a literature survey**. *International Journal on Digital Libraries*, vol. 17, no. 4, 2015, pp. 305-338.

BORLIDO, D. J. A. **Indústria 4.0: Aplicação a Sistemas de Manutenção**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia – Universidade do Porto. Portugal. p. 1-70. 2017.

CALDAS, C.H; SOIBELMAN.L. & HAN, J. **Automated classification of construction project documents**, J. Comput. Civ. 2002, p. 234–243.

CORREIA, A. K. **Tratamento de falhas de uma caldeira de Biomassa utilizando a análise de modo e efeito de falhas – FMEA: estudo de caso em uma indústria papelreira**. Monografia em Tecnologia em Manutenção Industrial. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). 2017.

DOHI, T. et al. **Optimizing the repair-time limit replacement schedule with discounting and imperfect repair**. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 7, n. 1, p. 71-84, jan-abr 2001.

DUDA, R.; PETER, H. **Pattern Classification and Scene Analysis**. Nova York: 1 ed. Wiley–Blackwell, 1973.

DUFFUAA, S. O.; RAOUF, A.; CAMPBELL, J. D. **Planning and control of maintenance systems: modeling and analysis**. Nova York: John Wiley & Sons, 1999.

FANGOHR, H. et al. **Data Exploration and Analysis with Jupyter Notebooks**. In: 17th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (ICALEPCS'19), 2019, New York, NY, USA. p. 799-806. 2019.

FISHER, A.; GRODZINSKY, F. S. **The Anatomy of Programming Languages**. *Englewood Cliffs*, New Jersey: Prentice Hall. p. 557. 1993.

GONÇALVES, H. **Gestão da manutenção na indústria 4.0**. Relatório de Dissertação do Mestrado em Engenharia de Produção. Instituto Politécnico de Setúbal. Setúbal: p. 1-50. 2020.

GREGÓRIO, Gabriela. P.; SILVEIRA, Aline. D. **Manutenção industrial**. Editora Grupo A. Porto Alegre: vol. 1. ed. 1. Porto Alegre. 2018.

HENN, Érico Antônio Lopes. **Máquinas de Fluxo**. 2ª Edição. Santa Maria: Editora UFMS. 2006.

JURAFSKY, Daniel; MARTIN, James. **Speech and Language Processing: An Introduction to Speech Recognition, Computational Linguistics and Natural Language Processing**. Nova Jersey: Prentice Hall, 2008.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. **Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0**. *Acatech*, p. 13-78, 2013.

KÖRBER, Marian; FROMMEL, Christoph. **Automated Planning and Optimization of a Draping Processes Within the CATIA Environment Using a Python Software Tool**. *Procedia Manufacturing*, Elsevier BV, v. 38, p. 808-815.

LI, Tianshu; ALIPOUR, Mohamad, HARRIS, Devin K. **Mapping textual descriptions to condition ratings to assist bridge inspection and condition assessment using hierarchical attention**, *Automation in Construction*, 2021, V 129.

LUNDGREN, Camilla; BOKRANTZ, Jon; SKOOGH, Anders. **A strategy development process for Smart Maintenance implementation**. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2021.

MACEDO, Rodrigo de. **Dimensionamento, projeto e simulação de um rotor hidráulico tipo Francis simples**. 2015. Panambi, 2015.

MELO, A. V. & FUSARO. T. C. **Avaliação de Métodos de Análise de Riscos Aplicados a Barragens**. 2015. **XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens**. Foz do Iguaçu – PR.

MOREIRA, E, L, M. **Análise da Implementação da Manutenção Produtiva Total na Área de Estamparia em uma Empresa do Setor Automobilístico**. 2003. 52 f. Monografia (Especialização) - Universidade de Taubaté, Taubaté, 2003.

POÓR, Peter; BASL Jose; ZENISEK, D. **Predictive Maintenance 4.0 as next evolution step in industrial maintenance development**. 2019 International Research Conference on Smart Computing and Systems Engineering (SCSE), Colombo, Sri Lanka, 2019, pp. 245-253.

RASMUSSEN, Jens. **Risk Management in a Dynamic Society: A Modelling Problem**. *Safety Science Vol 27 Smorum*, Dinamarca, 1997 pp. 183-213.

RUSSELL, Stuart; NORVIG, Peter. **Artificial Intelligence: A Modern Approach**. 3ª ed. Rio de Janeiro - RJ: Elsevier Editora, 2013.

RUTAGAMA, M. **Deep Learning for Predictive Maintenance in Impoundment Hydropower Plants**, Tese P.H.D. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, p. 1-56, Suíça, 2019.

SANTOS, V; A. **Manual Prático de Manutenção Industrial**. Editoria Icone, 3ª Edição. 2010.

SCHWAB, K. **The Fourth Industrial Revolution**. World Economic Fórum. Genebra, Suíça. 2016.

SOARES, G. A. **Desenvolvimento de política de manutenção baseada nos conceitos da indústria 4.0: Smart system aplicado para uma caldeira de uma indústria papelreira**. 2022. 96 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2022.

SOARES, M. **Palestra: Transformadores de Potência – Fabricação e Ensaio Elétricos de Alta Tensão**. Apresentada no CEFET-MG, 2019

SOBRINHO, O, G, et al. **Inteligência artificial e processamento de linguagem natural no monitoramento da estrada de ferro Vitória – Minas**. X Congresso Rodoferroviário Português. Lisboa, 2022.

TONI, V; COSTA, L; BOTELHO, M; BELINELLI, M; RIGONI, M. **Natural Language Processing (NLP) Algorithm Integrated with FMECA Analysis Applied in the Maintenance Plans Development to Power Generation System Assets**. **Proceedings of the 3 rd South American International Industrial Engineering and Operations Management – IEOM Conference**, Asunción, Paraguay, July 19-21, 2022.

TRALLI, F. C. **Modelagem de dinâmica de rotores de unidades hidrogeradoras**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

UNIVERTEC CEFET-MG. Transformadores: Aspectos Construtivos dos Transformadores de Potência. 2013 Disponível em: http://univertecefetmg.blogspot.com.br/2013/11/toshibatransformadores-aspectos_19.html. Acesso em 13 de junho de 2023.

VIANA, H. R. G. PCM, Planejamento e controle da manutenção, Rio de Janeiro: Editora Qualitymark, 2002.

WIREMAN, Terry. **Benchmarking Best Practices In Maintenance Management**. INDUSTRIAL PRESS INC. 1 edição. março 2003.

**APÊNDICE A - Artigo publicado durante o ciclo IC UTFPR (2021-2022)
relacionado ao desenvolvimento da pesquisa do referido TCC.**

The Natural Language Processing (NLP) Algorithm Integrated with FMECA Analysis Applied in the Maintenance Plans Development to Power Generation System Assets

Vinicius M.D. Toni, Luana A.G. da Costa and Matheus E.T. Botelho

Department of Mechanical Engineering, UTFPR – Federal University of Technology of the Paraná, Profa. Laura Pacheco Bastos Avenue.800, 85053-525 Guarapuava, Brazil.
viniciustoni@utfpr.edu.br, luanac@alunos.utfpr.edu.br and matheuseiji@alunos.utfpr.edu.br

Marjorie Maria Belinelli

Department of Mechanical Engineering and Maintenance Industrial Department, UTFPR – Federal University of Technology of the Paraná, Profa. Laura Pacheco Bastos Avenue.800, 85053-525 Guarapuava, Brazil.
belinelli@utfpr.edu.br

Marcelo Rodrigues and Emerson Rigoni

Department of Electrotechnical Engineering, UTFPR – Federal University of Technology of Paraná, 3165 Sete de Setembro Avenue, 80230-901 Curitiba-PR, Brazil.
marcelor@utfpr.edu.br and rigoni@utfpr.edu.br

Abstract

Global electricity consumption has continued to grow rapidly. This growth of consumption shows that energy will be one of the major problems in the future. Maintenance of the energy supply is essential, as the interruption of this service leads to higher expenses, representing substantial monetary losses and even legal penalties for the power generation company (Azam et al,2021). Hydroelectricity is the basis of the Brazilian energy matrix. Therefore, it is clear the need to maintain the availability and operational reliability of hydroelectric plants, so as not to compromise the continuity and conformity (quality) of the electrical energy supply to the end consumer. Ensuring availability along with the reliability of hydroelectric plants can be maintained by employing appropriate maintenance policies that reduce the likelihood of failure or even eliminate its root causes, preventing failure from occurring. The aim of this paper is presenting a proposed smart maintenance system model that integrates Natural Language Processing (NLP) algorithm and FMECA (Failure Mode, Effects & Criticality Analysis) database automated by Power BI® for the development of consistent maintenance plans for hydrogenerators assets. This integrated innovative tool can identify the operational subsystem chronic failure modes supporting industrial managers to incorporate tasks aimed at strengthening and increasing the maintenance plan consistency in blocking failure modes before them occurrences. This work was applied to a case study in a 525 Kv transformer of a hydrogenerator unit type Francis to demonstrate its use and contribute to its understanding.

Keywords

Smart Maintenance System, NLP algorithm, FMECA, Consistent Maintenance Plans, Francis Hydrogenerator.

1. Introduction

Hydro generators are the main industrial assets in a hydroelectric power plant. The occurrence of failures in these hydro generators reduces efficiency and can stop the power generation. The unavailability of the power generation system demands costly maintenance actions for the reestablishment of assets and may incur in fines imposed by regulatory agencies, such as ANEEL (Brazilian Electrical Energy Regulatory Agency) in Brazil.

The availability and reliability of electrical energy generation systems can be maintained using appropriate maintenance policies, making it possible to anticipate failures and eliminate their causes. Thus, it is essential the adoption of assertive decisions on maintenance management that aim to develop an effective maintenance policy, ensuring high productivity levels while optimizing costs and resources.

The Brazilian hydroelectric sector (UHE) corresponds to most of the energy generating potential in the country. According to the National Electric Power Agency (ANEEL) the electric energy represents approximately 58.5% of the Brazilian energetic matrix, followed by Thermoelectrics (24.35%) and by Wind Energies (10.54%) (ANEEL 2021).

Industrial maintenance aims to maintain the availability of machines and equipment with adequate performance, so it needs to actively analyze machine failures and manufacturing facilities to directly act on the causes and modes of the failures, cutting them down or even completely.

The automation of the maintenance management decision making, applying different types of statistical analysis techniques and database science, aims to reduce the production costs of the electricity generation system and not to compromise the supply of electricity (system reliability guarantee). This research consists in the NLP algorithm application to structure a search system on textual information contained in Power generation assets FMECA failure analysis database. This smart system aims to assist engineers and industrial managers to develop consistent maintenance plans to block chronic failure modes in Hydroelectric Power Plants (HPPs).

The FMECA (Failure Mode Effects and Criticality Analysis) quality tool has an important application in industrial maintenance management, as it aims to analyze the causes of failures and their effects, directing the identification of effective preventive actions. The use of FMECA analysis has benefits for the maintenance plans development, but its textual information structure in spreadsheet format imposes a slowdown in searching and managing this information, making it difficult to maintenance policy construction.

With the constant increase in the data generated amount from machinery records and maintenance work orders, the industrial sectors need seek to apply new technologies from industry 4.0 to treat and structure database information and get better management process. The use of technologies, such as Big Data, can be applied to facilitate the data reading in order to generate concrete statistics to making decision maintenance process. This automatized management process presents in this new industrial era is denominate Smart Maintenance or Maintenance 4.0 (Lundgren et al. 2021).

Generally, the maintenance actives history data and machinery operating parameters are collected from informal records and texts information, which are executed by operators and/or maintainers workers. This makes it difficult to apply a strictly quantitative analysis. However, it is possible to apply Natural Language Processing (NLP) with algorithms systematically built to obtain better search results to texts database with fast performance and reliability.

1.1 Objectives

The aim of this paper is presenting a proposed smart system model that integrates Machine Learning NLP algorithm and FMECA analysis automatized by Power-BI* for the development of consistency maintenance plans for hydrogenerators assets. This integrated innovative tool can identify the operational subsystem chronic failure modes supporting industrial managers to incorporate tasks aimed at strengthening and increasing the maintenance plan consistency in blocking failure modes before them occurrences. This approach was applied to a maintenance case study in a 525 Kv three-phase transformer which is part of a hydrogenerator unit type Francis to demonstrate its use and contribute to its understanding.

2. Literature Review

Maintenance management is an activity that allows the continuous and controlled process improvement with an optimal use of available resources and the critical operations or activities detection. An adequate maintenance management can ensure high productivity and machinery preservation (Belinelli 2012; Ding et al. 2014; EL Houda et al. 2021).

Hydro power plants (HPPs) require attention from the operation and maintenance teams due their operational unavailability can result in high unexpected spending. Therefore, it is necessary to structure a strong and adequate maintenance policy for the hydroelectric industrial assets. The aggregation of technologies present in Industry 4.0 allows the of decision-making processes optimization and agility to industrial maintenance, aiming at robust and effective decision-making (Rutagama 2019).

The industry 4.0 advent is considered as a natural transition process from traditional to modern manufacturing systems, evolving the maintenance management of industrial assets to the management model Smart Maintenance, which is defined as "an organizational design for the maintenance management of environments factories that have technologies universal digital (Lima and Polido 2021; Lundgren et al. 2020).

Industry 4.0 is composed of tools such as Big Data, Machine Learning, Internet of Things (IOT), Intelligence, Artificial Automation Systems, Physical Cybernetic Information Systems, Cloud Computing, Cyber Physical Systems (CPS), Augmented Reality, Additive Manufacturing, and others. An application of these technologies in maintenance management, it is possible obtain an effectively manage with higher level of reliability, robustness and mainly to prevent the failures modes (Poór et al. 2019; Bokrantz et al. 2020).

Finally, the most important and innovative part of this study is the tool developed with NPL algorithm integrated to FMECA database. This management smart system to assist engineers and industrial managers to planning the industrial assets maintenance better. The system developed is capable to identify chronic problems which affects the performance of the electrical energy generation system. Thus, helping structure effectives maintenance actions to mitigate these failures, ensuring availability and reliability in the hydro generator functions.

3. Methods

In this work, a smart system to assist for maintenance decision-making has been developed. The aim is to facilitate the development of the consistent maintenance plans to power generation systems components. The Figure 1 show the system functions.

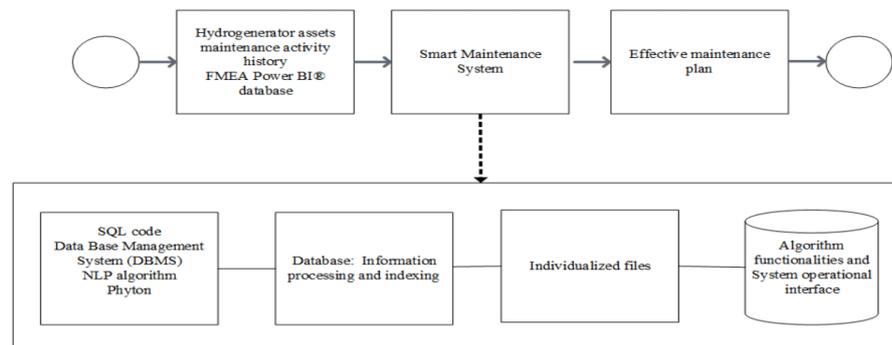


Figure 1. Smart Maintenance System NLP algorithm structure

4. Data Collection

In this paper, the PLN tool was applied to a maintenance planning case study to demonstrate its use and contribute to its understanding. The research then proposes a qualitative approach, since it will be based on the analysis of textual data, of an applied nature, with the development of practical knowledge to a specific problem. A hydrogenerator unit type Francis was selected for this purpose. Hydroelectric plants are of great importance in Brazil due to the predominance of this type of energy in its energy matrix. The Figure 2 show the hydrogenerator functional tree highlighting the Elevator Transformer main components used in this study.

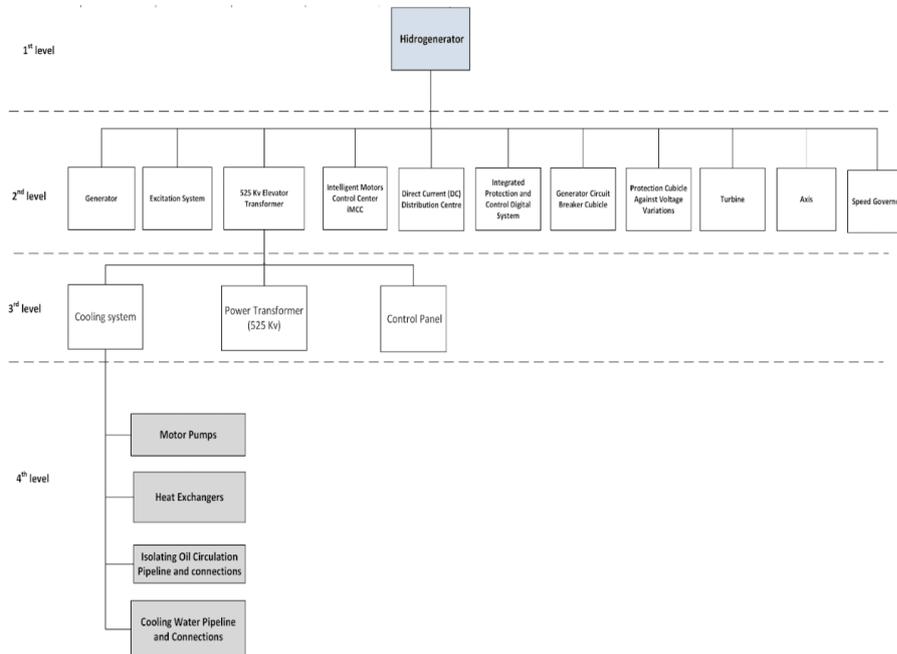


Figure 2. 525 Kv Power Transformer System Functional Tree (FT)

The purpose of a Functional Tree (FT) is to structure, in a logical and hierarchical way, the interdependence between the different components of a system, to expose how each one performs its functions. The elevator transformer object of the study has 308 components in its structure, which are distributed in seven subsystems, which are: Transformer Cooling system (34 components), Control panel (60 components), Oil-preservation system (43 components), Active part of the transformer (18 components), 525 Kv transformer Bushings (72 components), Transformer Protection and Control system (7 components) and Terminal board panel (74 components).

The smart maintenance system was applied to transformer cooling system whose function is to cool of the water and insulating oil circuit. This subsystem consists of motor pumps, heat exchangers and water and oil pipelines.

4.1 Automated Power-BI® FMECA Maintenance Database

The 525 Kv Transformer Cooling system database was used in this case study to development an adequate maintenance plans for assets. This database was automated applied the Power BI® tool, aiming to facilitate the data visualization and search as: failure mode, component type, TAG, cause, effect, and preventive actions. Figure 3 shows the FMECA Power-BI database.

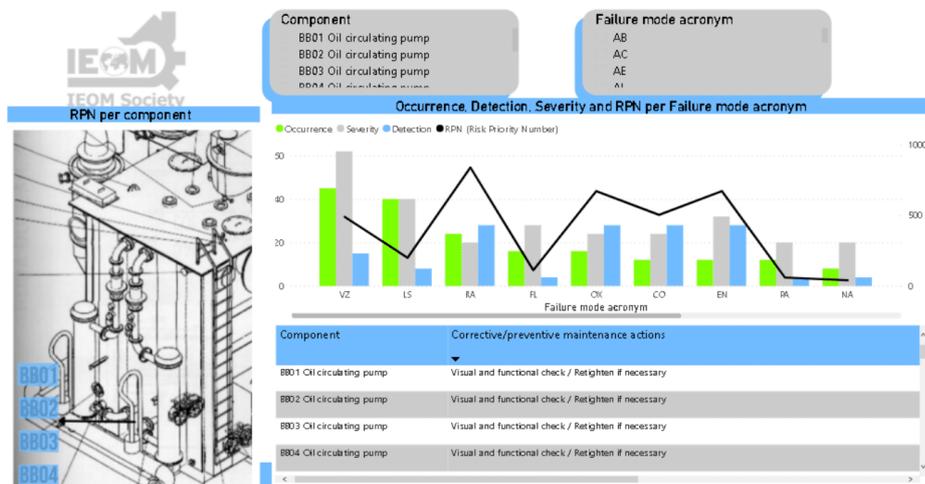


Figure 3. FMECA Power-BI database (Motor pumps analysis)

To develop the textual information searcher engine in the FMECA database was used the Structured Query Language (SQL) from a database management system MYSQL. The Snowflakes Schema dimensional data modeling, represented by Figure 4, was structured to relate the primary keys of each column with of the FMECA foreign keys.

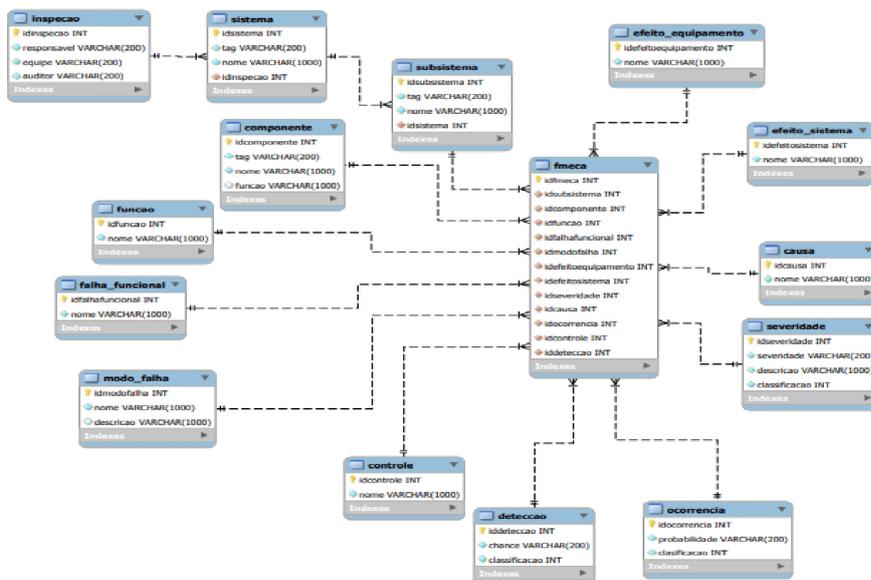


Figure 4. Dimensional data modeling of the FMECA database searcher.

5. Results and Discussion

5.1 PLN Search Algorithm

To build the Smart maintenance system, the Python programming language was used, due to its learning ease and use simplicity, compared to other programming language. The Spyder was the integrated development environment used, due to its principal focus on data processing and analysis. This smart system was developed aims of performing the queries return using of a specific word (keyword) and classified based on the failure mode frequency context.

To query a component, the algorithm functionality activated is the component ID return and its TAG from the component name insertion, as shown in Figure 5. This function is executed from the "searchid_bycompname" function request inserting the component name argument, either in single or double quotes.

```
def searchid_bycompname(compname):
    con = pymysql.connect(host='localhost', user='root', passwd= senha, db='fmea')
    cursorid = con.cursor()
    cursorid.execute('select idcomponente, tag from componente where nome = %s', compname)
    if cursorid.rowcount > 0:
        retorno = cursorid.fetchall()
        print(retorno)
    else:
        print("component name not found")
    cursorid.close()
    con.close()
```

Figure 5. Algorithm search function by ID (component)

The function occurs from the database connection using the MYSQL library. This function establishes the cursor opening, which executes the code specified in the Data Base Management System (DBMS). If the query returns one row or more, the console shows the return in double format, as shown the Figure 6. Otherwise, if the component is not found, a warning is returned.

```
In [18]: searchid_forcompname('Moto bombas')
        ((1, '01004.1.1'),)
```

Figure 6. Result of the query using the 'Motor pump' argument.

Another query function established into the maintenance smart system is the search using the identifier (ID) or TAG as an argument, obtained as result the component name. All these functions demonstrated can be applied to obtain a deep knowledge of the component into the database with limited information inputs.

To realize queries using failure mode as argument, the activated functionality is the failure mode frequency query, inserting the search word in the format single or double quotes. This functionality can run it by requesting the "searchfreq_byfailure" function. The code detail is presented in Figure 7.

```
def searchfreq_byfailure(modofalha):
    conexao = pymysql.connect(host='localhost', user='root', passwd= senha, db='fmea')
    cursorid = conexao.cursor()
    cursorid.execute("SELECT modo_falha.idmodofalha, modo_falha.nome as modo_falha, fmea.idfmea,
    comp = set()
    freq = set()

    for modo_falha in cursorid:
        comp.add(modo_falha[4])
        freq.add(modo_falha[2])

    print('\n Different components found: ', comp)
    print('\n Number of different components found: ', str(len(comp)))
    print('\n Frequency of occurrence of failure mode: ', len(freq))
    cursorid.close()
    conexao.close()
```

Figure 7. Frequency search function of the algorithm

The function occurs from the database connection using the MYSQL library. This this function establishes the cursor opening, which executes the code specified in the Data Base Management System (DBMS). The code aims to structure the relationship between the FMECA Power BI® database and the foreign keys with their primary keys aggregated. An important factor is the filtering command by inserting the “Where” argument, which is filled in by the function argument. The Figure 8 presents the FMECA database connection with Keywords system.

```
SELECT modo_falha.idmodofalha, modo_falha.nome as modo_falha, fmeca.idfmeca, componente.idcomponente,
componente.nome as componente, severidade.classificacao as severidade,
ocorrencia.classificacao as ocorrencia, deteccao.classificacao as deteccao,
severidade.classificacao * ocorrencia.classificacao * deteccao.classificacao as NPR
FROM fmeca
JOIN componente on fmeca.idcomponente = componente.idcomponente
JOIN modo_falha on fmeca.idmodofalha = modo_falha.idmodofalha
JOIN severidade on fmeca.idseveridade = severidade.idseveridade
JOIN ocorrencia on fmeca.idocorrencia = ocorrencia.idocorrencia
JOIN deteccao on fmeca.iddeteccao = deteccao.iddeteccao
where modo_falha.nome = "fluxo ou vazão anormal"
```

Figure 8. SQL code of the frequency function

Subsequently, two variables assume empty commands. These commands are filled in by the query data at positions number four and number two respectively, referring to the component name and the FMECA database unique identifier. With both sets filled in, it is possible to present the components name with the failure mode, the subsystem different components quantity and frequency that appears the failure modes in the search, as showed in Figure 9.

```
In [49]: searchfreq_byfailure("fluxo ou vazão anormal")

Different components found: {'BOM-00198 Bomba (Bomba 1 de circula  o de   leo do
trafo) ', 'BOM-00200 Bomba (Bomba 3 de circula  o de   leo do trafo) ', 'BOM-00201
Bomba (Bomba 4 de circula  o de   leo do trafo) ', 'BOM-00199 Bomba (Bomba 2 de
circula  o de   leo do trafo) '}
```

Number of different components found: 4
Frequency of occurrence of failure mode: 16

Figure 9. Algorithm of the “searchfreq_byfailure” function query result using “abnormal flow or outflow”

This query, in a generalized way, returns the name of all components, the quantity of these components and the frequency of the failures modes aggregated to components. This information is fundamental for the maintenance plan construction process.

5.2 Development Maintenance Plan

The functions composed in the search system allow the maintenance plan construction based on the failure modes frequency and severity. A maintenance plan based on these variables is effective to identify the main and chronic failures that must be mitigated within an operating subsystem. The failure modes visual identification is achieved into the Smart maintenance system by the WordCloud library. Figure 10 shows the WordCloud obtained with the chronological failure modes present in the transformer cooling system.



Figure 10. Chronic failure modes (WordCloud)

Ensure that the "Looseness" failure mode has a higher frequency among others Transformer Cooling system failures modes. Other failure modes such as "Leak", "Deformation" and "Abnormal flow" are also easily identified, making it easier to identify the most chronic failure modes that occur in this hydrogenerator subsystem.

The WordCloud resultant identifies in order of priority the most chronic failure modes, assisting in decision making process relating to the resources planning applied in maintenance tasks. This directs human, financial and material resources to execute priority the tasks that aimed at mitigating and/or eliminating those failure modes, which most affect operational performance. In addition, the identification of chronic failure modes facilitates the choice of employees training type, as well as the investment amount to parts, materials, and tools.

The maintenance plan development is carried out with the analysis of the information grouping around the failure modes, such as frequency and risk priority number (RPN). Figure 11 shows the table model returned with the "Looseness" argument researched.

Preventive Plans Development Process							
Failure Mode	Frequency of occurrence	TAG	Component	Severity	Occurrence	Detection	RPN (Risk Priority Number)
Looseness	24	01004.1.2.1	Heat exchanger TC-01	6	5	1	30
		01004.1.2.2	Heat exchanger TC-02				
		01004.1.2.3	Heat exchanger TC-03				
		01004.1.2.4	Heat exchanger TC-04				
	01004.1.1.1	BB01 Oil circulating pump	4	5	1	20	
	01004.1.1.2	BB02 Oil circulating pump					
	01004.1.1.3	BB03 Oil circulating pump					
	01004.1.1.4	BB04 Oil circulating pump					

Figure 11. Information grouping related to the "Looseness" failure mode

The information grouping of the failures modes components that affect the energy generation system operational performance, assist the engineers and managers to developed effectives maintenance plans to mitigate and/or solve these chronic maintenance problems. Equally assist the development of FMECA analysis process, standardizing terms to failure modes, effects, mechanisms, and preventive tasks. The maintenance tasks for the preventive plan assembly are inserted into the FMECA database automated by Power BI® that makes it easy the preventive plan joining/assembly and streamlines access to the maintenance tasks for execution.

6. Conclusion

Hydroelectricity is the basis of the Brazilian energy matrix. Therefore, it is clear the need to maintain the availability and operational reliability of hydroelectric plants, so as not to compromise the continuity and conformity (quality) of the electrical energy supply to the end consumer. Ensuring availability along with the reliability of hydroelectric plants can be maintained by employing appropriate maintenance policies that reduce the likelihood of failure or even eliminate its root causes, preventing failure from occurring.

This paper proposed an innovative and automated tool which contributes to ensuring the assertiveness in decision making to develop adequate preventive maintenance plans. This approach was applied to a maintenance case study of a 525Kv elevator transformer of a hydrogenerator unit type Francis to demonstrate its use and contribute to its understanding.

As a main result, the smart maintenance system development using NLP algorithm integrated with FMECA database assists in a consistent maintenance plan development, which aims to anticipate failures and eliminate their causes. Thus, it is possible to determine and prioritize assertively the maintenance actions, ensuring availability and reliability operational to the energy generation process. In addition, it enables better maintenance planning decision-making, directing pieces, material, human and financial resources to execute the exact maintenance actions that mitigate the chronic failure modes.

Consequently, it is expected that this study will contribute to researchers and professionals in the field of maintenance in improving decision making in industrial planning in electric energy generation systems. Thus, it is possible to determine and prioritize assertively the maintenance actions, ensuring availability and reliability operational to the energy generation process.

As opportunities for future work, the authors suggest determining the optimal time interval for performing the maintenance plan (replacing assets components or operational systems preventive/predictive inspection) and automatizing the maintenance tasks decision through the NLP algorithm applied to maintenance work orders database analysis.

References

- Azam, A., Rafiq, M., Shafique, M., Zahng, H., Ateeq, M., and Yuan, J., Analyzing the relationship between economic growth and electricity consumption from renewable and non-renewable sources: Fresh evidence from newly industrialized countries, *Journal Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol.44, 2021.
- Belinelli, M., Souza G., Portugal, E. and Kaminski, E., Application of Quality Tools for Failure Analysis in Mechanical Systems of Industrial Bench Drill Presses - A Case Study in a Farm Harvester Factory. *Proceedings of the 2012 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, pp. 1391-1400 Istanbul, Turkey, July 3 – 6, 2012.
- Bokrantz, J., Skoogh, A., Berlin, C., Wuest, T., and Stahre, J., Smart Maintenance: a research agenda for industrial maintenance management, *International Journal of Production Economics*, Elsevier, vol. 224, 2020.
- Ding, S., Kamaruddin, S. and Azid A., Development of a model for optimal maintenance policy selection. *European Journal of Industrial Engineering*, v. 8, n. 1, pp. 50-68, 2014.
- Generation Data, Brazilian Electricity National Agency, ANEEL, Available: <http://www.aneel.gov.br/dados-da-geracao>, Accessed on December 20, 2021.
- Houda K. N. E., Hafed T., Nouara, O., Antar, S. and Djamel B., The contribution of maintenance to improve the operational performance of an industrial process. *Proceedings of the 11th Annual International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, pp. 2587-2595, Singapore, March 7-11, 2021.
- Lima W. S. and Polido M., Industry 4.0: Technologies and Applications. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, pp. 3811-3818, Sao Paulo, Brazil, April 5 - 8, 2021.
- Lundgren C., Bokrantz, J. and Skoogh, A., A strategy development process for Smart Maintenance implementation. *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 32 no. 9, pp. 142-166, 2021.
- Poór, P., Ženisek, D., and Basl, J., Historical Overview of Maintenance Management Strategies: Development from Breakdown Maintenance to Predictive Maintenance in Accordance with Four Industrial Revolutions. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, pp. 495-504 Pilsen, Czech Republic, July 23-26, 2019.

Proceedings of the 3rd South American International Industrial Engineering and Operations Management Conference, Asuncion, Paraguay, July 19-21, 2022

Prasanna, N. K. K.; Akula, S. and Desai, T. N., Integration of Maintenance Strategies for Improved Asset Reliability and Availability. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, pp. 1514-1518, 2011.

Rutagarama, M. Deep Learning for Predictive Maintenance in Impoundment Hydropower Plants. Ph.D. Thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland, 2019.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the financial support provided by MEC (Brazilian Education Ministry), Federal University of Technology - Paraná (UTFPR) and Araucária Foundation for Scientific and Technological Development of Paraná State for the development of the present research.

Biographies

Vinicius M.D. Toni is a Mechanical Engineering student at Federal University of Technology - Paraná (UTFPR) and Scientific initiation research scholar of UTFPR-IC/MEC. The focus of his research is industrial maintenance management, decision support systems, intelligent manufacturing.

Luana A.G. da Costa is a Mechanical Engineering student at Federal University of Technology - Paraná (UTFPR) and Scientific initiation research student. The focus of her research is industrial maintenance management, decision support systems and quality engineering.

Matheus E.T. Botelho is a Mechanical Engineering student at Federal University of Technology - Paraná (UTFPR) and Scientific initiation research scholar of Araucária Foundation FA-IC/UTFPR. The focus of his research is industrial maintenance management, decision support systems and human reliability.

Marjorie Maria Belinelli is Full Professor at Department of Mechanical and Maintenance Engineering of Federal University of Technology - Paraná (UTFPR). She is author and co-author more than 20 publications on national and international journals (International Journal of Engineering Trends and Technology, Cahiers Agricultures, Brazilian Journal of Business, Annals of Agricultural and Environmental Medicine), book chapters and conferences proceedings. Dra Belinelli has participated as Researcher in many national and international projects at the University of São Paulo (USP) and Polytechnical University of Marche (UNIVPM). The focus of her research is industrial maintenance management, decision-making theory, decision support systems, intelligent manufacturing, risk assessment methodologies, reliability and maintenance engineering, human reliability, production systems optimization and work ergonomics.

Marcelo Rodrigues is Titular Professor at Department of Electrotechnical Engineering of Federal University of Technology - Paraná (UTFPR) and MBA in Maintenance Management coordinator. Dr. Rodrigues is a member of ABRAMAN (Brazilian Maintenance Association) committee and also author and co-author of the books and papers about maintenance engineering theme. The focus of his research is industrial maintenance management, decision-making theory, risk assessment methodologies, reliability and maintenance engineering, human reliability, and power generation systems.

Emerson Rigoni is Titular Professor at Department of Electrotechnical Engineering of Federal University of Technology - Paraná (UTFPR) and MBA in Reliability and Risks Analysis coordinator. Dr. Rigoni is a member of ABRAMAN (Brazilian Maintenance Association) committee and also author and co-author of the books and papers about maintenance and reliability engineering theme. The focus of his research is industrial maintenance management, decision-making theory, risk assessment methodologies, reliability and maintenance engineering, quality engineering and power generation systems.

ANEXO A – DATABASE DE ORDENS DE SERVIÇO

OS (no.)	Descrição da Ordem de Serviço (OS)	Ação Corretiva - Resolver a Descrição da OS	Causas do Modo de Falha - RCA (análise de causa raiz)	Ação Preventiva
67585	Sanar a vibração excessiva e o aumento de temperatura das bombas de circulação de óleo	Troca da bomba	Oscilação de alta frequência no eixo ou carcaça da bomba, provocando desgaste e desalinhamento	(1) Monitoramento online da temperatura (2) Inspeção visual em campo
23910	Resolver a deficiência no sistema de bombeamento dos fluídos	Troca da bomba	Oscilação de alta frequência no eixo ou carcaça da bomba, provocando desgaste e desalinhamento	(1) Monitoramento online da frequência de rotação (análise de vibração). (2) Inspeção visual em campo
118502	Eliminar variação de fluxo nas bombas do sistema de resfriamento	(1) Troca da bomba (2) Eliminação de vazamentos (3) Troca dos elementos filtrantes (4) Troca da bomba	(1) Perda de potência (2) Vazamento (3) Entupimento dos elementos filtrantes (4) Cavitação	(1) Monitoramento da temperatura (2) Inspeção em campo/verificação de vazamento
63582	Sanar baixa pressão no sistema de bombeamento	(1) Troca da bomba (2) Eliminação de vazamentos. (3) Troca dos elementos -filtrantes (4) Troca da bomba	(1) Perda de potência (2) Vazamento (3) Entupimento dos elementos filtrantes (4) Cavitação	(1) Monitoramento da pressão (2) Inspeção em campo
27732	Corrigir vazamento encontrado nas bombas de circulação de óleo	(1) Trocas dos elementos de vedação (2) Troca bomba	(1) Elementos de vedação danificados (2) Desgaste	(1) Monitoramento da temperatura (2) Inspeção em campo / verificação de vazamento
12188	Eliminar vazamento encontrado próximo aos elementos de vedação nas bombas de circulação de óleo	(1) Trocas do-s elementos de vedação (2) Troca bomba	(1) Elementos de vedação danificados (2) Desgaste	Inspeção visual

OS (no.)	Descrição da Ordem de Serviço (OS)	Ação Corretiva - Resolver a Descrição da OS	Causas do Modo de Falha - RCA (análise de causa raiz)	Ação Preventiva
81609	Consertar falha na partida e corrigir aumento de temperatura do sistema de bombas de circulação de óleo	(1) Revisão no sistema de automação (2) Restabelecimento do sistema	(1) Defeito no sistema de automação (2) Erro de operação	(1) Monitoramento da temperatura (2) Inspeção em campo
78064	Consertar falha na partida do sistema de bombas de circulação de óleo	(1) Revisão no sistema de automação (2) Restabelecimento do sistema	(1) Defeito no sistema de automação (2) Erro de operação	(1) Monitoramento da temperatura (2) Inspeção em campo
31796	Realizar a lubrificação do sistema de bombeamento de circulação de óleo, devido a presença de ruídos elevados	(1) Lubrificar o sistema	(1) Lubrificação deficiente	(1) Monitoramento da temperatura (2) Inspeção em campo
15359	Verificar alinhamento dos componentes das bombas de circulação de óleo a fim de solucionar o ruído anormal ocasionado	(2) Realizar o alinhamento da bomba	(2) Desalinhamento	(1) Monitoramento da temperatura (2) Inspeção em campo
115859	Sanar ruído apresentado nas bombas de circulação de óleo	(3) Troca da bomba	(3) Desgaste	(1) Monitoramento da temperatura (2) Inspeção em campo
85266	Resolver ruído anormal a partir de variação do sistema de bombeamento de fluidos	(1) Lubrificar o sistema (2) Realizar o alinhamento da bomba (3) Troca da bomba	(1) Lubrificação deficiente (2) Desalinhamento (3) Desgaste	(1) Monitoramento da temperatura (2) Inspeção em campo
70567	Sanar obstrução da operação das bombas de circulação de óleo a partir da revisão do sistema de alimentação	(1) Desobstruir o movimento do eixo (2) Revisar o sistema de alimentação (3) Troca da bomba	(1) Obstrução do movimento do eixo (2) Falta de alimentação auxiliar (2) Defeito interno à bomba	(1) Monitoramento da temperatura (2) Inspeção em campo

OS (no.)	Descrição da Ordem de Serviço (OS)	Ação Corretiva - Resolver a Descrição da OS	Causas do Modo de Falha - RCA (análise de causa raiz)	Ação Preventiva
87889	Sanar inoperância do sistema de bombeamento devido obstrução nas bombas de circulação de óleo	(1) Desobstruir o movimento do eixo (2) Revisar o sistema de alimentação (3) Troca da bomba	(1) Obstrução do movimento do eixo (2) Falta de alimentação auxiliar (2) Defeito interno à bomba	(1) Monitoramento da temperatura (2) Inspeção em campo
27901	Resolver anormalidade na pressão das bombas de circulação de óleo devido deficiência de refrigeração do trafo elevador	Revisar o sistema de sensoriamento de vazão	Falha no sistema de sensoriamento de vazão	(1) Monitoramento da temperatura (2) Inspeção em campo
13312	Corrigir a redução ou excesso de pressão de saída das bombas de circulação de óleo	Revisar o sistema de sensoriamento de vazão	Falha no sistema de sensoriamento de vazão	(1) Monitoramento da pressão de saída (2) Inspeção em campo
59876	Verificar afrouxamento dos componentes das bombas de circulação de óleo a partir da deficiência no sistema de resfriamento	(1) Balanceamento do sistema e/ou troca (2) Realizar o alinhamento da bomba (3) Troca da bomba (4) Reaperto	(1) Vibração excessiva (2) Desalinhamento (3) Desgaste (4) Falta de manutenção/reaperto	(1) Monitoramento da temperatura (2) Inspeção em campo
31945	Concertar redução da solidez da fixação do invólucro em sua base de sustentação ou de montagem da bomba de circulação de óleo	(1) Balanceamento do sistema e/ou troca (2) Realizar o alinhamento da bomba (3) Troca da bomba (4) Reaperto	(1) Vibração excessiva (2) Desalinhamento (3) Desgaste (4) Falta de manutenção/reaperto	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
71759	Verificar limitação da troca de calor no sistema do transformador	Limpeza	Matéria estranha no sistema, contaminando a superfície por sujeiras e depósitos sólidos	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo

OS (no.)	Descrição da Ordem de Serviço (OS)	Ação Corretiva - Resolver a Descrição da OS	Causas do Modo de Falha - RCA (análise de causa raiz)	Ação Preventiva
81708	Sanar oxidação dos terminais das bombas de circulação de óleo, o qual está provocando curto-circuito	Limpeza e proteção dos terminais	Matéria estranha no sistema, contaminando a superfície por sujeiras e depósitos sólidos	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
94034	Eliminar a limitação da troca de calor no sistema do transformador devido obstrução	(1) Desobstrução dos trocadores de calor (2) Limpeza	(1) Obstrução e impedimento do movimento livre de fluido pelos trocadores de calor (2) Matéria Estranha ao Sistema	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
83253	Sanar entupimento dos tubos, os quais estão reduzindo a capacidade de resfriar adequadamente o sistema	(1) Desobstrução dos trocadores de calor (2) Limpeza	(1) Obstrução e impedimento do movimento livre de fluido pelos trocadores de calor (2) Matéria Estranha ao Sistema	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
63322	Eliminar a limitação da troca de calor no sistema do transformador, devido as camadas de corrosão e oxidação na superfície	(1) Tratamento de superfície e pintura (2) Limpeza	(1) Camadas de ferrugem e erosão da superfície (2) Matéria estranha no sistema, contaminando a superfície por sujeiras e depósitos sólidos	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
32135	Sanar a incapacidade dos trocadores de calor de resfriar adequadamente o sistema, devido as camadas de corrosão e oxidação na superfície	(1) Tratamento de superfície e pintura (2) Limpeza	(1) Camadas de ferrugem e erosão da superfície (2) Matéria estranha no sistema, contaminando a superfície por sujeiras e depósitos sólidos	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
90463	Eliminar afrouxamento dos componentes do sistema de troca de calor, os quais estão gerando vibração excessiva	(1) Balanceamento do sistema e/ou troca (2) Reaperto	(1) Vibração excessiva (2) Falta de manutenção/reaperto	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo

OS (no.)	Descrição da Ordem de Serviço (OS)	Ação Corretiva - Resolver a Descrição da OS	Causas do Modo de Falha - RCA (análise de causa raiz)	Ação Preventiva
118102	Sanar a redução da solidez e afrouxamento da fixação do invólucro em sua base de sustentação ou de montagem do trocador de calor	(1) Balanceamento do sistema e/ou troca (2) Reaperto	(1) Vibração excessiva (2) Falta de manutenção/reaperto	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
64724	Eliminar os vazamentos pelas vedações do trocador de calor	Troca de vedações	Envelhecimento das vedações	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
56075	Eliminar os vazamentos pelas vedações do trocador de calor	Troca de vedações	Envelhecimento das vedações	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
27829	Corrigir nível anormal da troca de calor no sistema do transformador	Revisar o sistema de sensoramento	Falha no sistema de sensoramento	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
43489	Sanar nível excessivo ou insuficiente à quantidade especificada dos trocadores de calor do sistema	Revisar o sistema de sensoramento	Falha no sistema de sensoramento	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
91471	Consertar abalamento nas superfícies e aletas dos trocadores de calor	Tratamento de superfície e pintura	Perfuração da superfície das aletas e tubulações dos trocadores de calor	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
53774	Sanar os vazamentos dos fluidos esfriantes nos trocadores de calor devido a perfuração das superfícies e tubulações	Tratamento de superfície e pintura	Perfuração da superfície das aletas e tubulações dos trocadores de calor	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
95436	Corrigir deformações nos sistemas de trocadores de calor	(1) Revisão do projeto (2) Revisar plano de manutenção (3) Revisar sistema de troca de calor (4) Limpeza	(1) Deficiência do projeto (2) Deficiência no processo de manutenção (3) Sobrecarga (4) Elemento estranho	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo

OS (no.)	Descrição da Ordem de Serviço (OS)	Ação Corretiva - Resolver a Descrição da OS	Causas do Modo de Falha - RCA (análise de causa raiz)	Ação Preventiva
101796	Corrigir deformação da geometria do componente do trocador de calor, que está ocasionando deficiência no funcionamento	(1) Revisão do projeto (2) Revisar plano de manutenção (3) Revisar sistema de troca de calor (4) Limpeza	(1) Deficiência do projeto (2) Deficiência no processo de manutenção (3) Sobrecarga (4) Elemento estranho	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
113011	Sanar vazamento na tubulação dos feixes de tubos	(1) Bloqueio do vazamento / substituição da tubulação (2) Tratamento de superfície e pintura	(1) Rompimento da tubulação (2) Oxidação/corrosão	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
120313	Corrigir vazamento dos fluidos esfriantes no casco tubo	(1) Bloqueio do vazamento / substituição da tubulação (2) Tratamento de superfície e pintura	(1) Rompimento da tubulação (2) Oxidação/corrosão	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
52106	Verificar deterioração da capacidade de resfriamento das aletas estanhadas, que ocasiona aumento pouco significativo da temperatura do transformador	Tratamento de superfície e pintura	Corrosão interna e externa resultante de agentes químicos ou do oxigênio e umidade do ar ambiente.	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
109346	Consertar perfuração da superfície das aletas provocada por oxidação ou choque com outros materiais perfurantes	Tratamento de superfície e pintura	Corrosão interna e externa resultante de agentes químicos ou do oxigênio e umidade do ar ambiente.	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
89155	Sanar o mau contato no pressostato diferencial que resulta na falta de desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura	(1) Troca pressostato (2) Reaperto	(1) Oxidação dos contatos (2) Afrouxamento dos elementos de fixação dos componentes	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo

OS (no.)	Descrição da Ordem de Serviço (OS)	Ação Corretiva - Resolver a Descrição da OS	Causas do Modo de Falha - RCA (análise de causa raiz)	Ação Preventiva
32922	Consertar mau contato e falha no sensor do pressostato diferencial, o qual ocasiona medição indevida e conseqüente perda de carga nos trocadores de calor	(1) Troca pressostato (2) Reaperto	(1) Oxidação dos contatos (2) Afrouxamento dos elementos de fixação dos componentes	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
91322	Sanar mau contato no pressostato diferencial devido a possível queima, que resulta na falta de desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura, ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	Troca pressostato	(1) Vibração Sobrecarga (2)	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
52082	Consertar pressostato diferencial, o mesmo não está realizando a medição, queima do sistema	Troca pressostato	(1) Vibração (2) Sobrecarga	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
80276	Consertar rompimento dos cabos do pressostato diferencial	Troca pressostato	Vibração excessiva	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
42428	Sanar rompimento dos cabeamentos de conexão ocasionando ausência de medição	Troca do cabeamento do pressostato	Vibração excessiva	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
83223	Sanar vazamento de óleo na tubulação, falha parcial ou total na conexão	(1) Troca vedações (2) Tratamento de superfície e pintura (3) Troca tubulação	(1) Envelhecimento das vedações (2) Trincas (3) Vibração	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
108192	Sanar vazamento de óleo na tubulação, falha parcial ou total na conexão	(1) Troca vedações (2) Tratamento de superfície e pintura (3) Troca tubulação	(1) Envelhecimento das vedações (2) Trincas (3) Vibração	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo

OS (no.)	Descrição da Ordem de Serviço (OS)	Ação Corretiva - Resolver a Descrição da OS	Causas do Modo de Falha - RCA (análise de causa raiz)	Ação Preventiva
85435	Corrigir a perda de escoamento do óleo, operação inadequada da válvula borboleta do óleo isolante	Revisar o sistema de alimentação	(1) Falha no sistema automação (2) Erro de operação	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
93969	Corrigir inoperância da válvula borboleta do óleo isolante, permitindo travamento ou retorno de fluido	Revisar o sistema de alimentação	(1) Falha no sistema automação (2) Erro de operação	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
31477	Corrigir a perda de escoamento do óleo, operação inadequada da válvula com atuador solenoide	Revisar o sistema de alimentação	(1) Falha no sistema automação (2) Erro de operação	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
54385	Corrigir inoperância da válvula com atuador solenoide, permitindo travamento ou retorno de fluido	Revisar o sistema de alimentação	(1) Falha no sistema automação (2) Erro de operação	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
15432	Verificar aquecimento anormal do transformador, envio de parâmetros incorretos pelo sensor de temperatura e diminuição da capacidade da unidade geradora	Troca sensor de temperatura	Falha interna do componente	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
99785	Inoperância do sensor de temperatura, não identifica temperatura correta do óleo	Troca sensor de temperatura	Falha interna do componente	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
80820	Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura	(1) Troca sensor de temperatura (2) Reaperto	(1) Oxidação dos contatos (2) Afrouxamento dos elementos de fixação dos componentes	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
40837	Corrigir falha no sensor de temperatura ocasionando medição indevida da temperatura de óleo (entrada)	(1) Troca sensor de temperatura (2) Reaperto	(1) Oxidação dos contatos (2) Afrouxamento dos elementos de fixação dos componentes	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo

OS (no.)	Descrição da Ordem de Serviço (OS)	Ação Corretiva - Resolver a Descrição da OS	Causas do Modo de Falha - RCA (análise de causa raiz)	Ação Preventiva
64263	Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	Troca sensor de temperatura	(1) Vibração (2) Sobrecarga	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
47501	Ausência de medição da temperatura de óleo (entrada) pelo sensor de temperatura	Verificar a instalação do sensor de temperatura e troca se necessário	(1) Vibração (2) Sobrecarga	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
34468	Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	Verificar a instalação do sensor de temperatura e troca se necessário	Vibração excessiva	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
83882	Consertar o rompimento dos cabeios de conexão do sensor de temperatura, ocasionando ausência de medição da temperatura de óleo (entrada)	Troca do cabeamento do sensor de temperatura	Vibração excessiva	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
61780	Corrigir aquecimento anormal do transformador devido a falha no sensor de temperatura, envio de parâmetros incorretos e diminuição da capacidade da unidade geradora	Troca sensor de temperatura	Falha interna do componente	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
62491	Corrigir a inoperância do sensor de temperatura de saída de óleo, não identifica temperatura correta do óleo	Troca sensor de temperatura	Falha interna do componente	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo

OS (no.)	Descrição da Ordem de Serviço (OS)	Ação Corretiva - Resolver a Descrição da OS	Causas do Modo de Falha - RCA (análise de causa raiz)	Ação Preventiva
34250	Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	(1) Troca sensor de temperatura (2) Reaperto	(1) Oxidação dos contatos (2) Afrouxamento dos elementos de fixação dos componentes	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
116408	Corrigir falha no sensor ocasionando medição indevida da temperatura de saída do óleo	(1) Troca sensor de temperatura (2) Reaperto	(1) Oxidação dos contatos (2) Afrouxamento dos elementos de fixação dos componentes	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
12297	Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	Troca sensor de temperatura	(1) Vibração (2) Sobrecarga	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
66696	Ausência de medição da temperatura de óleo (saída)	Troca sensor de temperatura	(1) Vibração (2) Sobrecarga	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
112593	Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	Troca sensor de temperatura	Vibração excessiva	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
79632	Rompimento dos cabeamentos de conexão do sensor de temperatura que registra a saída óleo isolante, ocasionando ausência de medição da temperatura de óleo	Troca do cabeamento do pressostato	Vibração excessiva	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
27531	Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura, devido a falha no Fluxostato de óleo	Verificar a instalação do Fluxostato de óleo (chave de vazão) e troca se necessário	(1) Oxidação dos contatos (2) Afrouxamento dos elementos de fixação dos componentes	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo

OS (no.)	Descrição da Ordem de Serviço (OS)	Ação Corretiva - Resolver a Descrição da OS	Causas do Modo de Falha - RCA (análise de causa raiz)	Ação Preventiva
85442	Falha no sensor do Fluxostato de óleo, ocasionando medição indevida da vazão de óleo	Verificar a instalação do Fluxostato de óleo (chave de vazão) e troca se necessário	Oxidação dos contatos (2) Afrouxamento dos elementos de fixação dos componentes	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
119514	Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura devido a falha no Fluxostato de óleo, ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	Troca do Fluxostato de óleo (chave de vazão)	(1) Vibração (2) Sobrecarga	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
16457	Ausência de medição da vazão de óleo	Troca do Fluxostato de óleo (chave de vazão)	(1) Vibração (2) Sobrecarga	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
31615	Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura, devido a falha no Fluxostato de óleo, ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	Troca do Fluxostato de óleo (chave de vazão)	Vibração excessiva	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
121969	Rompimento dos cabeamentos de conexão do Fluxostato de óleo, ocasionando ausência de medição da vazão de óleo	Troca do Fluxostato de óleo (chave de vazão)	Vibração excessiva	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
104484	Aquecimento anormal do transformador, devido a falha na tubulação de água para resfriamento e conexões, causando redução da sua capacidade de operação	(1) Tratamento de superfície e pintura (2) Troca tubulação	Corrosão interna e externa resultante de agentes químicos ou do oxigênio e umidade do ar ambiente.	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
53847	Vazamento de água pela tubulação de água para resfriamento	(1) Tratamento de superfície e pintura (2) Troca tubulação	Corrosão interna e externa.	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo

OS (no.)	Descrição da Ordem de Serviço (OS)	Ação Corretiva - Resolver a Descrição da OS	Causas do Modo de Falha - RCA (análise de causa raiz)	Ação Preventiva
62388	Impedimento da circulação dos fluidos de resfriamento devido obstrução da tubulação de água para resfriamento	(1) Troca tubulação (2) Limpeza	(1) Obstrução total da tubulação (2) Matéria Estranha ao Sistema	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
35880	Impossibilidade de circulação de fluidos, devido falha na tubulação de água para resfriamento	(1) Troca tubulação (2) Limpeza	(1) Obstrução total da tubulação (2) Matéria Estranha ao Sistema	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
52283	Deficiência na circulação de fluidos, vazamento pela tubulação de água para resfriamento, podendo impactar no resfriamento do trafo elevador	(1) Reaperto (2) Limpeza (3) Tratamento de superfície e pintura	(1) Vibração excessiva (2) Falta de manutenção/reaperto	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
13787	Redução da solidez da fixação do invólucro em sua base de sustentação ou de montagem	(1) Reaperto (2) Limpeza (3) Tratamento de superfície e pintura	(1) Vibração excessiva (2) Falta de manutenção/reaperto	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
81379	Perda de proteção superficial e estética da tubulação de água para resfriamento	(1) Reaperto (2) Limpeza (3) Tratamento de superfície e pintura	(1) Oxidação/corrosão (2) material estranho degradante	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
90522	Perda da cor original da tubulação de água para resfriamento devido à oxidação ou degradação da pintura original	(1) Reaperto (2) Limpeza (3) Tratamento de superfície e pintura	(1) Oxidação/corrosão (2) material estranho degradante	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
33985	Deficiência na circulação de fluidos, devido a correntes induzidas na tubulação de água para resfriamento, impactando na refrigeração do trafo elevador	Verificar aterramento	Presença de tensões e correntes induzidas por circuitos externos	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo

OS (no.)	Descrição da Ordem de Serviço (OS)	Ação Corretiva - Resolver a Descrição da OS	Causas do Modo de Falha - RCA (análise de causa raiz)	Ação Preventiva
96530	Pode gerar aquecimento e degradação das características, ou interferência no funcionamento de outros equipamentos.	Verificar aterramento	Presença de tensões e correntes induzidas por circuitos externos	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
19630	Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura, devido a falha no sensor de temperatura de entrada de água, ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	(1) Troca sensor de temperatura (2) Reaperto	(1) Oxidação dos contatos (2) Afrouxamento dos elementos de fixação dos componentes	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
30766	Falha no sensor de temperatura de entrada de água, ocasionando medição indevida da temperatura da água	(1) Troca sensor de temperatura (2) Reaperto	(1) Oxidação dos contatos (2) Afrouxamento dos elementos de fixação dos componentes	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
77336	Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura, devido a falha no sensor de temperatura que mede a entrada de água, ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	Troca sensor de temperatura	(1) Vibração (2) Sobrecarga	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
21197	Ausência de medição da temperatura da entrada da água	Troca sensor de temperatura	(1) Vibração (2) Sobrecarga	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
82077	Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura	Verificar a instalação do sensor de temperatura e troca se necessário	Vibração excessiva	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo

OS (no.)	Descrição da Ordem de Serviço (OS)	Ação Corretiva - Resolver a Descrição da OS	Causas do Modo de Falha - RCA (análise de causa raiz)	Ação Preventiva
22936	Rompimento dos cabeamentos de conexão do sensor de temperatura de entrada de água, ocasionando ausência de medição da temperatura da água	Troca do cabeamento do sensor de temperatura	Vibração excessiva	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
43213	Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura, devido a falha no sensor de temperatura de saída da água, ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	(1) Troca sensor de temperatura (2) Reaperto	(1) Oxidação dos contatos (2) Afrouxamento dos elementos de fixação dos componentes	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
43067	Falha no sensor de temperatura ocasionando medição indevida da temperatura de saída de água	(1) Troca sensor de temperatura (2) Reaperto	(1) Oxidação dos contatos (2) Afrouxamento dos elementos de fixação dos componentes	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
82420	Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura, devido a falha no sensor de temperatura de saída de água, ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	Troca sensor de temperatura	(1) Vibração (2) Sobrecarga	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
40637	Ausência de medição da temperatura da água pelo sensor de saída de água	(1) Troca sensor de temperatura (2) Reaperto	(1) Vibração (2) Sobrecarga	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
66819	Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura, devido a falha no sensor de temperatura de saída da água.	Troca sensor de temperatura	Vibração excessiva	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo

OS (no.)	Descrição da Ordem de Serviço (OS)	Ação Corretiva - Resolver a Descrição da OS	Causas do Modo de Falha - RCA (análise de causa raiz)	Ação Preventiva
10664	Rompimento dos cabeamentos de conexão, dos sensores de temperatura de saída de água, ocasionando ausência de medição da temperatura da água	Troca do cabeamento do sensor de temperatura	Vibração excessiva	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
11436	Baixa variação nos níveis de resfriamento do transformador e aumento de temperatura no funcionamento do trafo elevador, devido saturação do filtro de água	(1) Limpeza (2) Troca filtro	(1) Sujeira (2) Saturação do elemento filtrante	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
35211	Não filtra adequadamente a água para o sistema de resfriamento e ocorre a diminuição da passagem de água e aumento de impurezas	(1) Limpeza (2) Troca filtro	(1) Sujeira (2) Saturação do elemento filtrante	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
15713	Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura, por falha do detector de água no óleo do sistema de refrigeração ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	(1) Troca Detector de água no óleo (2) Reaperto	(1) Oxidação dos contatos (2) Afrouxamento dos elementos de fixação dos componentes	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
55419	Falha no sensor ocasionando medição indevida da presença/quantidade de água no sistema de refrigeração	(1) Troca Detector de água no óleo (2) Reaperto	(1) Oxidação dos contatos (2) Afrouxamento dos elementos de fixação dos componentes	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
120909	Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura, devido a falha no detector de água no sistema de refrigeração.	Troca Detector de água no óleo	(1) Vibração (2) Sobrecarga	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo

OS (no.)	Descrição da Ordem de Serviço (OS)	Ação Corretiva - Resolver a Descrição da OS	Causas do Modo de Falha - RCA (análise de causa raiz)	Ação Preventiva
60014	Ausência de medição da presença/quantidade de água no sistema de refrigeração	(1) Troca Detector de água no óleo (2) Reaperto	(1) Vibração (2) Sobrecarga	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
27336	Falha durante supervisão do sistema de resfriamento pelo detector de água ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	Troca Detector de água no óleo	Vibração excessiva	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
85229	Rompimento dos cabeamentos de conexão ocasionando ausência de medição da presença/quantidade de água no sistema de refrigeração	Troca do cabeamento do Detector de água no óleo	Vibração excessiva	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
97063	Não controlar e não supervisionar o sistema de resfriamento	Verificar a instalação do sensor do Detector de água no óleo e troca se necessário	Falha no sistema de automação	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
106352	Alarme indevido por falha do detector de água no sistema de óleo de refrigeração	Verificar a instalação do sensor do Detector de água no óleo e troca se necessário	Falha no sistema de automação	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
58435	Não controlar e não supervisionar o sistema de resfriamento ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	Troca Detector de água no óleo	Vibração excessiva	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
43568	Desajuste do "Set point" do indicador de fluxo, devido a falha do detector de água, ocasionando alarme indevido.	Troca Detector de água no óleo	Vibração excessiva	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo

OS (no.)	Descrição da Ordem de Serviço (OS)	Ação Corretiva - Resolver a Descrição da OS	Causas do Modo de Falha - RCA (análise de causa raiz)	Ação Preventiva
50795	Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura, por falha do Fluxostato de água (chave de vazão), ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	(1) Verificar a instalação do Fluxostato de água (chave de vazão) e troca se necessário (2) Reaperto	(1) Oxidação dos contatos (2) Afrouxamento dos elementos de fixação dos componentes	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
120779	Falha no sensor ocasionando medição indevida da vazão de água para os trocadores de calor e baixa vazão de água nos trocadores de calor	(1) Verificar a instalação do Fluxostato de água (chave de vazão) e troca se necessário (2) Reaperto	(1) Oxidação dos contatos (2) Afrouxamento dos elementos de fixação dos componentes	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
45541	Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura, devido a falha na chave de vazão ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	(1) Troca do Fluxostato de água (chave de vazão) (2) Limpeza	(1) Vibração (2) Sobrecarga (3) Sujeira	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo
97881	Ausência de medição da vazão de água para os trocadores de calor	(1) Troca do Fluxostato de água (chave de vazão). (2) Limpeza	(1) Vibração (2) Sobrecarga (3) Sujeira	Monitorar temperatura/ inspeção em campo
52742	Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura, por falha no Fluxostato de água, chave de vazão, ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	Troca do cabeamento do Fluxostato de água	Vibração excessiva	Monitoração da temperatura/ inspeção em campo

ANEXO B – RESULTADO DO PLANO GERADO PELA APLICAÇÃO

Descrição da Ordem de Serviço (OS)	Componente	Modo de Falha	RPN
Sanar a vibração excessiva e o aumento de temperatura das bombas de circulação de óleo	Bomba de circulação de óleo	Folga Excessiva	-
Resolver a deficiência no sistema de bombeamento dos fluídos	Sistema de pressurização de óleo	Água no Sistema	-
Eliminar variação de fluxo nas bombas do sistema de resfriamento	SRE-0013 - Sistema de Resfriamento (Resfriamento do Trafo)	Água no Sistema	-
Sanar baixa pressão no sistema de bombeamento	Bomba de circulação de óleo	Pressão Anormal	-
Corrigir vazamento encontrado nas bombas de circulação de óleo	Bomba de circulação de óleo	Vazamento	-
Eliminar vazamento encontrado próximo aos elementos de vedação nas bombas de circulação de óleo	Bomba de circulação de óleo	Vazamento	-
Consertar falha na partida e corrigir aumento de temperatura do sistema de bombas de circulação de óleo	Bomba de circulação de óleo	Falha de Partida	-
Consertar falha na partida do sistema de bombas de circulação de óleo	Bomba de circulação de óleo	Falha de Partida	-
Realizar a lubrificação do sistema de bombeamento de circulação de óleo, devido a presença de ruídos elevados	Bomba de circulação de óleo	Lubrificação Inadequada	-
Verificar alinhamento dos componentes das bombas de circulação de óleo a fim de solucionar o ruído anormal ocasionado	Bomba de circulação de óleo	Fluxo/Vazão Anormal	-

Descrição da Ordem de Serviço (OS)	Componente	Modo de Falha	RPN
Sanar ruído apresentado nas bombas de circulação de óleo	Bomba de circulação de óleo		-
Resolver ruído anormal a partir de variação do sistema de bombeamento de fluidos	Sistema de pressurização de óleo	Fluxo/Vazão Anormal	-
Sanar obstrução da operação das bombas de circulação de óleo a partir da revisão do sistema de alimentação	Fonte de Alimentação	Execução da Operação	-
Sanar inoperância do sistema de bombeamento devido obstrução nas bombas de circulação de óleo	Bomba de circulação de óleo	Água no Sistema	-
Resolver anormalidade na pressão das bombas de circulação de óleo devido deficiência de refrigeração do Trafo elevador	Tubulação e conexões da linha de circulação de óleo isolante do Trafo	Pressão Anormal	210
Corrigir a redução ou excesso de pressão de saída das bombas de circulação de óleo	Dispositivo de alívio de pressão	Pressão Anormal	-
Verificar afrouxamento dos componentes das bombas de circulação de óleo a partir da deficiência no sistema de resfriamento	SRE-0013 - Sistema de Resfriamento (Resfriamento do Trafo)	Afrouxamento	-
Concertar redução da solidez da fixação do invólucro em sua base de sustentação ou de montagem da bomba de circulação de óleo	BOM-00198 Bomba (Bomba 1 de circulação de óleo do Trafo)	Montagem de Terceiros	-
Verificar limitação da troca de calor no sistema do transformador, ocasionando de perda de confiabilidade do sistema	Bomba de circulação de óleo	Perda de Controle/Comando	-
Sanar oxidação dos terminais das bombas de circulação de óleo, o qual está provocando curto-circuito	Terminais tipo ilhós		-
Eliminar a limitação da troca de calor no sistema do transformador devido obstrução	Transformador	Obstrução	-

Descrição da Ordem de Serviço (OS)	Componente	Modo de Falha	RPN
Sanar entupimento dos tubos, os quais estão reduzindo a capacidade de resfriar adequadamente o sistema	Sistema de pressurização de óleo	Água no Sistema	-
Eliminar a limitação da troca de calor no sistema do transformador, devido as camadas de corrosão e oxidação na superfície	Transformador	Água no Sistema	-
Sanar a incapacidade dos trocadores de calor de resfriar adequadamente o sistema, devido as camadas de corrosão e oxidação na superfície	TCA-05111 Trocador de calor (Trocador de calor 1 do Trafo)	Água no Sistema	-
Eliminar afrouxamento dos componentes do sistema de troca de calor, os quais estão gerando vibração excessiva	TCA-05111 Trocador de calor (Trocador de calor 1 do Trafo)	Afrouxamento	-
Sanar a redução da solidez e afrouxamento da fixação do invólucro em sua base de sustentação ou de montagem do trocador de calor	TCA-05111 Trocador de calor (Trocador de calor 1 do Trafo)	Afrouxamento	-
Eliminar os vazamentos pelas vedações do trocador de calor	TCA-05111 Trocador de calor (Trocador de calor 1 do trafo)		-
Eliminar os vazamentos pelas vedações do trocador de calor	TCA-05111 Trocador de calor (Trocador de calor 1 do trafo)		-
Corrigir nível anormal da troca de calor no sistema do transformador	Transformador	Fluxo/Vazão Anormal	-
Sanar nível excessivo ou insuficiente à quantidade especificada dos trocadores de calor do sistema	TCA-05111 Trocador de calor (Trocador de calor 1 do trafo)	Água no Sistema	-
Consertar abalamento nas superfícies e aletas dos trocadores de calor	Aletas estanhadas		-
Sanar os vazamentos dos fluidos esfriantes nos trocadores de calor devido a perfuração das superfícies e tubulações	Sistema de contenção de vazamento de óleo	Vazamento	-

Descrição da Ordem de Serviço (OS)	Componente	Modo de Falha	RPN
Corrigir deformação da geometria do componente do trocador de calor, que está ocasionando deficiência no funcionamento	TCA-05111 Trocador de calor (Trocador de calor 1 do trafo)	Deformação	-
Sanar vazamento na tubulação dos feixes de tubos	Tubulação	Vazamento	-
Corrigir vazamento dos fluidos esfriantes no casco tubo	Casco-tubo (feixes de tubo)	Vazamento	-
Verificar deteriorização da capacidade de resfriamento das aletas estanhadas, que ocasiona aumento pouco significativo da temperatura do transformador	Aletas estanhadas		-
Consertar perfuração da superfície das aletas provocada por oxidação ou choque com outros materiais perfurantes	Aletas estanhadas		-
Sanar o mau contato no pressostato diferencial que resulta na falta de desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura, ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	Transformador	Mau Contato	-
Consertar mau contato e falha no sensor do pressostato diferencial, o qual ocasiona medição indevida e consequente perda de carga nos trocadores de calor	Pressostato diferencial 63D-T1TEL	Mau Contato	-
Sanar mau contato no pressostato diferencial devido a possível queima, que resulta na falta de desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura, ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	Pressostato diferencial 63D-T1TEL	Mau Contato	-
Consertar pressostato diferencial, o mesmo não está realizando a medição, queima do sistema	Pressostato diferencial 63D-T1TEL	Queima	-

Descrição da Ordem de Serviço (OS)	Componente	Modo de Falha	RPN
Consertar rompimento dos cabos do pressostato diferencial	Pressostato diferencial 63D-T1TEL		-
Sanar rompimento dos cabamentos de conexão ocasionando ausência de medição	Haste de conexão (chave-manopla)	Defeito Proteção /Supervisão/Controle e Medição	-
Sanar vazamento de óleo na tubulação, falha parcial ou total na conexão	Tubulação de óleo	Vazamento	-
Sanar vazamento de óleo na tubulação, falha parcial ou total na conexão	Tubulação de óleo	Vazamento	-
Corrigir a perda de escoamento do óleo, operação inadequada da válvula borboleta do óleo isolante	Válvula borboleta do óleo isolante	Perda de Controle/Comando	98
Corrigir inoperância da válvula borboleta do óleo isolante, permitindo travamento ou retorno de fluido	Válvula borboleta do óleo isolante	Travamento do Visor	98
Corrigir a perda de escoamento do óleo, operação inadequada da válvula com atuador solenoide	Válvula com atuador solenóide	Perda de Controle/Comando	98
Corrigir inoperância da válvula com atuador solenoide, permitindo travamento ou retorno de fluido	Válvula com atuador solenóide	Travamento do Visor	98
Verificar aquecimento anormal do transformador, envio de parâmetros incorretos pelo sensor de temperatura e diminuição da capacidade da unidade geradora	Unidade motora	Fluxo/Vazão Anormal	-
Inoperância do sensor de temperatura, não identifica temperatura correta do óleo	Sensor de temperatura (saída óleo isolante)	Atuação Correta da Proteção Elétrica	16
Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	Transformador	Água no Sistema	-

Descrição da Ordem de Serviço (OS)	Componente	Modo de Falha	RPN
Corrigir falha no sensor de temperatura ocasionando medição indevida da temperatura de óleo (entrada)	Sensor de temperatura (entrada óleo isolante)	Atuação Indevida da Proteção Elétrica	20
Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	Transformador	Água no Sistema	-
Ausência de medição da temperatura de óleo (entrada) pelo sensor de temperatura	Sensor de temperatura (entrada óleo isolante)	Defeito Proteção /Supervisão/Controle e Medição	20
Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	Transformador	Água no Sistema	-
Consertar o rompimento dos cabamentos de conexão do sensor de temperatura, ocasionando ausência de medição da temperatura de óleo (entrada)	Sensor de temperatura (entrada óleo isolante)	Defeito Proteção /Supervisão/Controle e Medição	20
Corrigir aquecimento anormal do transformador devido a falha no sensor de temperatura, envio de parâmetros incorretos e diminuição da capacidade da unidade geradora	Unidade motora	Fluxo/Vazão Anormal	-
Corrigir a inoperância do sensor de temperatura de saída de óleo, não identifica temperatura correta do óleo	Sensor de temperatura (saída óleo isolante)	Atuação Correta da Proteção Elétrica	16
Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	Transformador	Água no Sistema	-
Corrigir falha no sensor ocasionando medição indevida da temperatura de saída do óleo	Sensor de temperatura (saída óleo isolante)	Falha do contato de saída do relé	16

Descrição da Ordem de Serviço (OS)	Componente	Modo de Falha	RPN
Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	Transformador	Água no Sistema	-
Ausência de medição da temperatura de óleo (saída)	Sensor de temperatura (saída óleo isolante)	Falha do contato de saída do relé	16
Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	Transformador	Água no Sistema	-
Rompimento dos cabeados de conexão do sensor de temperatura que registra a saída óleo isolante, ocasionando ausência de medição da temperatura de óleo	Sensor de temperatura (saída óleo isolante)	Falha do contato de saída do relé	16
Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura, devido a falha no Fluxostato de óleo, ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	Fluxostato de óleo (chave de vazão) sistema de refrigeração óleo/água	Água no Sistema	0
Falha no sensor do Fluxostato de óleo, ocasionando medição indevida da vazão de óleo	Fluxostato de óleo (chave de vazão) sistema de refrigeração óleo/água	Atuação Indevida da Proteção Elétrica	0
Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura devido a falha no Fluxostato de óleo, ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	Fluxostato de óleo (chave de vazão) sistema de refrigeração óleo/água	Água no Sistema	0
Ausência de medição da vazão de óleo	Fluxostato de óleo (chave de vazão) sistema de refrigeração óleo/água	Defeito Proteção /Supervisão/Controle e Medição	0

Descrição da Ordem de Serviço (OS)	Componente	Modo de Falha	RPN
Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura, devido a falha no Fluxostato de óleo, ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	Fluxostato de óleo (chave de vazão) sistema de refrigeração óleo/água	Água no Sistema	0
Rompimento dos cabeamentos de conexão do Fluxostato de óleo, ocasionando ausência de medição da vazão de óleo	Fluxostato de óleo (chave de vazão) sistema de refrigeração óleo/água	Defeito Proteção /Supervisão/Controle e Medição	0
Aquecimento anormal do transformador, devido a falha na tubulação de água para resfriamento e conexões, causando redução da sua capacidade de operação	Tubulação de água para resfriamento e conexões	Fluxo/Vazão Anormal	126
Vazamento de água pela tubulação de água para resfriamento, ocasionando perda na vazão da circulação dos fluidos de resfriamento	Tubulação de água para resfriamento e conexões	Água no Sistema	126
Impedimento da circulação dos fluidos de resfriamento devido obstrução da tubulação de água para resfriamento	Tubulação de água para resfriamento e conexões	Água no Sistema	126
Impossibilidade de circulação de fluídos, devido falha na tubulação de água para resfriamento	Tubulação de água para resfriamento e conexões	Água no Sistema	126
Deficiência na circulação de fluídos, vazamento pela tubulação de água para resfriamento, podendo impactar no resfriamento do Trafo elevador	SRE-0013 - Sistema de Resfriamento (Resfriamento do trafo)	Vazamento	-
Redução da solidez da fixação do invólucro em sua base de sustentação ou de montagem	Elementos de Fixação	Montagem de Terceiros	-
Perda de proteção superficial e estética da tubulação de água para resfriamento	Tubulação de água para resfriamento e conexões	Perda de Controle/Comando	126

Descrição da Ordem de Serviço (OS)	Componente	Modo de Falha	RPN
Perda da cor original da tubulação de água para resfriamento devido à oxidação ou degradação da pintura original	Tubulação de água para resfriamento e conexões	Perda de Controle/Comando	126
Deficiência na circulação de fluídos, devido a correntes induzidas na tubulação de água para resfriamento, impactando na refrigeração do Trafo elevador	Tubulação de água para resfriamento e conexões	Água no Sistema	126
Pode gerar aquecimento e degradação das características, ou interferência no funcionamento de outros equipamentos.		Interferência Eletromagnética	-
Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura, devido a falha no sensor de temperatura de entrada de água, ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	Sensor de temperatura (saída água)	Água no Sistema	50
Falha no sensor de temperatura de entrada de água, ocasionando medição indevida da temperatura da água	Sensor de temperatura (entrada água)	Água no Sistema	50
Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura, devido a falha no sensor de temperatura que mede a entrada de água, ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	Sensor de temperatura (entrada água)	Água no Sistema	50
Ausência de medição da temperatura da entrada da água	Sensor de temperatura (entrada água)	Água no Sistema	50

Descrição da Ordem de Serviço (OS)	Componente	Modo de Falha	RPN
Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura, devido a falha pelo sensor de temperatura que mede a temperatura da entrada da água ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	Sensor de temperatura (entrada água)	Água no Sistema	50
Rompimento dos cabeios de conexão do sensor de temperatura de entrada de água, ocasionando ausência de medição da temperatura da água	Sensor de temperatura (entrada água)	Água no Sistema	50
Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura, devido a falha no sensor de temperatura de saída da água, ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	Sensor de temperatura (saída água)	Água no Sistema	50
Falha no sensor de temperatura ocasionando medição indevida da temperatura de saída de água	Sensor de temperatura (saída água)	Falha do contato de saída do relé	50
Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura, devido a falha no sensor de temperatura de saída de água, ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	Sensor de temperatura (saída água)	Água no Sistema	50
Ausência de medição da temperatura da água pelo sensor de saída de água	Sensor de temperatura (saída água)	Água no Sistema	50
Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura, devido a falha no sensor de temperatura de saída da água, ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	Sensor de temperatura (saída água)	Água no Sistema	50

Descrição da Ordem de Serviço (OS)	Componente	Modo de Falha	RPN
Rompimento dos cabamentos de conexão, dos sensores de temperatura de saída de água, ocasionando ausência de medição da temperatura da água	Sensor de temperatura (saída água)	Água no Sistema	50
Baixa variação nos níveis de resfriamento do transformador e aumento de temperatura no funcionamento do Trafo elevador, devido saturação do filtro de água	Filtro de água	Água no Sistema	105
Não filtra adequadamente a água para o sistema de resfriamento e ocorre a diminuição da passagem de água e aumento de impurezas	Tubulação de água para resfriamento e conexões	Água no Sistema	126
Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura, por falha do detector de água no óleo do sistema de refrigeração ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	Detector de água no óleo do sistema de refrigeração óleo/água	Água no Sistema	50
Falha no sensor ocasionando medição indevida da presença/quantidade de água no sistema de refrigeração	Detector de água no óleo do sistema de refrigeração óleo/água	Água no Sistema	50
Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura, devido a falha no detector de água no sistema de refrigeração ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	Detector de água no óleo do sistema de refrigeração óleo/água	Água no Sistema	50
Ausência de medição da presença/quantidade de água no sistema de refrigeração	Detector de água no óleo do sistema de refrigeração óleo/água	Água no Sistema	50

Descrição da Ordem de Serviço (OS)	Componente	Modo de Falha	RPN
Falha durante supervisão do sistema de resfriamento pelo detector de água ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	Detector de água no óleo do sistema de refrigeração óleo/água	Água no Sistema	50
Rompimento dos cabeados de conexão ocasionando ausência de medição da presença/quantidade de água no sistema de refrigeração	Detector de água no óleo do sistema de refrigeração óleo/água	Água no Sistema	50
Não controlar e não supervisionar o sistema de resfriamento	SRE-0013 - Sistema de Resfriamento (Resfriamento do Trafo)	Água no Sistema	-
Alarme indevido por falha do detector de água no sistema de óleo de refrigeração	Detector de água no óleo do sistema de refrigeração óleo/água	Água no Sistema	50
Não controlar e não supervisionar o sistema de resfriamento ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	SRE-0013 - Sistema de Resfriamento (Resfriamento do Trafo)	Água no Sistema	-
Desajuste do "Set point" do indicador de fluxo, devido a falha do detector de água, ocasionando alarme indevido	Indicador de fluxo de óleo	Desajuste Eletroeletrônico	-
Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura, por falha do Fluxostato de água (chave de vazão), ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	Fluxostato de água (chave de vazão) sistema de refrigeração óleo/água	Água no Sistema	-

Falha no sensor ocasionando medição indevida da vazão de água para os trocadores de calor e baixa vazão de água nos trocadores de calor	Fluxostato de água (chave de vazão) sistema de refrigeração óleo/água	Água no Sistema	-
Descrição da Ordem de Serviço (OS)	Componente	Modo de Falha	RPN
Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura, devido a falha na chave de vazão ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	Fluxostato de óleo (chave de vazão) sistema de refrigeração óleo/água	Água no Sistema	0
Ausência de medição da vazão de água para os trocadores de calor	Fluxostato de água (chave de vazão) sistema de refrigeração óleo/água	Água no Sistema	-
Não desligar ou não alarmar o transformador por elevação de temperatura, por falha no Fluxostato de água, chave de vazão, ocasionando redução da confiabilidade do sistema de geração de energia	Fluxostato de água (chave de vazão) sistema de refrigeração óleo/água	Água no Sistema	-
Rompimento dos cabeamentos de conexão do Fluxostato de água, ocasionando ausência de medição da vazão de água para os trocadores de calor	Fluxostato de água (chave de vazão) sistema de refrigeração óleo/água	Água no Sistema	-