

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO

Rodrigo de França de Sá Menezes

*DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA WEB PARA
DIAGNÓSTICO DE FALHAS INCIPIENTES EM
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA*

São Luís
2026

Rodrigo de França de Sá Menezes

*DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA WEB PARA
DIAGNÓSTICO DE FALHAS INCIPIENTES EM
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA*

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia da Computação da UFMA, como requisito para a obtenção do grau de BACHAREL em Engenharia da Computação.

Shigeaki Leite de Lima, Dr.

(Orientador)

(Departamento de Engenharia Elétrica - DEE/UFMA)

São Luís

2026

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Menezes, Rodrigo de França de Sá.

Desenvolvimento de um sistema web para diagnóstico de
falhas incipientes em transformadores de potência /
Rodrigo de França de Sá Menezes. - 2026.

106 p.

Orientador(a): Shigeaki Leite de Lima.

Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia da
Computação, Universidade Federal do Maranhão, São Luís-ma,
2026.

1. Diagnóstico de Falhas. 2. Transformador de
Potência. 3. Plataforma Web. I. Lima, Shigeaki Leite de.
II. Título.

Rodrigo de França de Sá Menezes

*DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA WEB PARA
DIAGNÓSTICO DE FALHAS INCIPIENTES EM
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA*

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia da Computação da UFMA, como requisito para a obtenção do grau de BACHAREL em Engenharia da Computação.

Aprovado em 16 de julho de 2026

BANCA EXAMINADORA

Shigeaki Leite de Lima, Dr.

(Orientador)

(Departamento de Engenharia Elétrica - DEE/UFMA)

Sérgio Souza Costa, Dr.

(Coordenação de Engenharia da Computação - ECP/UFMA)

Pedro Baptista Fernandes, Dr.

(Coordenação de Engenharia da Computação - ECP/UFMA)

*“À minha esposa e aos meus filhos, que são a
razão de cada esforço.”*

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma plataforma web para monitoramento e diagnóstico de falhas em transformadores de potência, com foco na automação da Análise de Gases Dissolvidos (AGD). O sistema centraliza o histórico dos ativos e utiliza um motor de inferência híbrido em tempo real, integrando as diretrizes da norma IEC 60599 e a classificação por Redes Neurais baseadas no Método de Lima (2013). Para validar a interface e a experiência do usuário, foi realizada uma avaliação empírica de usabilidade com engenheiros eletricitas. Como resultado quantitativo, a aplicação do questionário *System Usability Scale* (SUS) obteve um score médio de 91,07 pontos, o que classifica a plataforma na categoria “Excelente”. A análise qualitativa dos *feedbacks* subjetivos confirmou a facilidade de uso do fluxo operacional, a clareza dos *dashboards* e a eficiência na exportação de relatórios técnicos em PDF, mapeando também pequenos ajustes de textitlayout em formulários como oportunidades de melhorias futuras. O estudo conclui que a automação do diagnóstico cromatográfico é uma solução viável e eficaz para subsidiar a tomada de decisão em estratégias de manutenção preditiva no setor elétrico.

Palavras-chave: Diagnóstico de falhas, transformadores de potência, plataforma *web*.

ABSTRACT

This work presents the development of a web platform for monitoring and diagnosing faults in power transformers, focusing on the automation of Dissolved Gas Analysis (DGA). The system centralizes asset history and utilizes a real-time hybrid inference engine, integrating the guidelines of the IEC 60599 standard and neural network classification based on Lima's Method (2013). To validate the interface and user experience, an empirical usability evaluation was conducted with electrical engineers. As a quantitative result, the application of the System Usability Scale (SUS) questionnaire achieved an average score of 91.07 points, which classifies the platform in the "Excellent" category. Qualitative analysis of subjective feedback confirmed the ease of use of the operational workflow, the clarity of the dashboards, and the efficiency in exporting technical reports in PDF, while also mapping minor layout adjustments in forms as opportunities for future improvements. The study concludes that the automation of chromatographic diagnosis is a viable and effective solution to support decision-making in predictive maintenance strategies within the power sector.

Keywords: Fault diagnosis, power transformers, web platform.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, à Universidade Federal do Maranhão, pela oportunidade de obter esta formação e por fornecer as condições necessárias para a realização deste trabalho.

À minha mãe, meu exemplo de resiliência e amor, que tantas vezes se privou de melhores condições de vida para garantir que seus filhos tivessem a melhor educação possível. Todo este esforço é também um reflexo da sua dedicação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Shigeaki, pelo acolhimento, pela paciência e pela dedicação durante toda esta jornada. A todos os professores que acompanharam minha trajetória, mas, de forma especial, ao Prof. Alex, pelos conselhos e por sempre incentivar minha criatividade; e ao Prof. Sérgio, por insistir em meu potencial e por nunca perder a esperança de que eu concluiria esta graduação.

Aos meus colegas de curso e de laboratório, pelas trocas de conhecimento, pelos momentos de descontração e pelo companheirismo indispensável.

À minha esposa, Mairla Raquel, e aos meus filhos, Mateo e Aurora, pelo amor incondicional, pela compreensão nos momentos de ausência, por sempre acreditarem em mim e por serem a minha maior motivação para concluir esta jornada.

A todos os amigos que, direta ou indiretamente, torceram por mim e tornaram este percurso mais leve.

Por fim, agradeço a Deus, pois sem Ele nada disso seria possível.

*“Quem olha para fora, sonha; quem olha
para dentro, desperta”.*

Carl Jung

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE QUADROS	13
LISTA DE ABREVIATURAS	14
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivos da Monografia	16
1.2 Estrutura do Trabalho	17
2 TRABALHOS RELACIONADOS	18
2.1 Síntese Comparativa	19
3 REFERENCIAL TEÓRICO	21
3.1 Transformadores de Potência	21
3.2 Análise de Gases Dissolvidos	23
3.2.1 IEC 60599	24
3.2.2 Método Baseado em Redes Neurais (Lima, 2013)	26
3.3 Engenharia de Software Moderna	28
3.3.1 Domain-Driven Design (DDD)	28
3.3.2 <i>Clean Architecture</i> (Arquitetura Limpa)	29
3.3.3 Arquitetura de Aplicações <i>Web</i> Modernas	30
3.3.4 Principais Bibliotecas Utilizadas	31
3.4 Engenharia de Usabilidade	33

4	MODELAGEM DA PLATAFORMA	35
4.1	Requisitos do Sistema	35
4.1.1	Requisitos Funcionais do Sistema	35
4.1.2	Requisitos Não-Funcionais do Sistema	37
4.2	Casos de Uso	38
4.3	(Exemplo) UC12 - Cadastrar Transformador	40
4.3.1	Entidades e Relacionamentos	42
4.4	Teste de Usabilidade	43
4.4.1	Planejamento e Protocolo de Execução	43
4.4.2	Perfil dos Participantes	44
4.4.3	Roteiro de Tarefas Propostas	44
5	IMPLEMENTAÇÃO DA PLATAFORMA	45
5.1	Implementação do Núcleo de Diagnóstico	45
5.1.1	Algoritmo Baseado em Redes Neurais (LIMA)	45
5.1.2	Algoritmo Baseado em Regras (IEC 60599)	47
5.2	Implementação da API e Persistência	48
5.2.1	Modelagem e Persistência de Dados (Prisma ORM)	48
5.2.2	Validação e Contratos de API (Zod)	49
5.3	Implementação da Interface (Frontend)	51
5.3.1	Visualização de Dados e Controle de Acesso	52
5.3.2	Exportação e Manipulação de Relatórios (PDF)	53
6	RESULTADOS	55
6.1	Telas da Aplicação	55
6.2	Validação Funcional: Estudos de Caso	58
6.2.1	Cenário 1: Operação Normal	58
6.2.2	Cenário 2: Detecção de Falha Térmica (T2/T3)	59

6.2.3	Cenário 3: Detecção de Descarga Parcial (PD) em Zona Não Con-	
	clusivas da IEC 60599	61
6.3	Geração de Relatórios Técnicos	62
6.4	Avaliação de Usabilidade (SUS)	64
6.4.1	Análise dos <i>Feedbacks</i> Subjetivos (Perguntas Abertas)	65
7	CONCLUSÃO	67
7.1	Considerações Finais	67
7.2	Trabalhos Futuros	68
	REFERÊNCIAS	69
	APÊNDICE A – DESCRIÇÃO DOS CASOS DE USO	71
A.1	UC01 - Autenticar Usuário	71
A.2	UC02 - Redefinir Senha	72
A.3	UC03 - Cadastrar Usuário	74
A.4	UC04 - Listar Usuários	75
A.5	UC05 - Detalhar Usuário	75
A.6	UC06 - Editar Usuário	76
A.7	UC07 - Cadastrar Papel	77
A.8	UC08 - Listar Papéis	78
A.9	UC09 - Detalhar Papel	78
A.10	UC10 - Editar Papel	80
A.11	UC11 - Excluir Papel	81
A.12	UC12 - Cadastrar Transformador	82
A.13	UC13 - Listar Transformadores	83
A.14	UC14 - Detalhar Transformador	84
A.15	UC15 - Editar Transformador	85

A.16 UC16 - Excluir Transformador	86
A.17 UC17 - Cadastrar Medição	87
A.18 UC18 - Detalhar Medição	88
A.19 UC19 - Editar Medição	89
A.20 UC20 - Excluir Medição	90
A.21 UC21 - Gerar Relatório de Diagnóstico de Transformador	91
A.22 UC22 - Gerar Relatório Geral de Todos os Transformadores	92
A.23 UC23 - Exportar Relatório em PDF	93
A.24 UC24 - Visualizar Dashboard	94
 APÊNDICE B – FORMULÁRIO DE INSCRIÇÃO PARA O TESTE DE USABI- LIDADE	 95
 APÊNDICE C – QUESTIONÁRIO DE USABILIDADE PÓS-TESTE (SUS)	 97
 APÊNDICE D – ROTEIRO DE TAREFAS DO TESTE DE USABILIDADE	 99

LISTA DE FIGURAS

1.1	Transformador de potência trifásico.	15
3.1	Representação do SEP e a atuação dos TPs	21
3.2	Esquema funcional de um transformador destacando o núcleo e enrolamentos	22
3.3	Danos catastróficos por superaquecimento e carbonização nos enrolamentos de um transformador	23
3.4	Representação gráfica das relações dos gases e das falhas detectadas.	26
3.5	Ilustração das camadas da Arquitetura Limpa e a Regra de Dependência. .	29
3.6	Dinâmica de comunicação entre Cliente Frontend (SPA) e Servidor Backend (API REST)	31
3.7	Escala SUS	34
4.1	Diagrama de Casos de Uso do Sistema	41
4.2	Diagrama Entidade-Relacionamento - Banco de Dados	42
6.1	Tela de <i>Login</i>	55
6.2	Tela de <i>Dashboard</i>	56
6.3	Tela de Listagem e Filtro de Transformadores	56
6.4	Tela de Registro de Transformadores	57
6.5	Tela de Detalhes de Transformador	57
6.6	Tela de Listagem e Filtro de Medições	58
6.7	Diagnóstico do sistema para o Cenário 1 (Operação Normal)	59
6.8	Diagnóstico de Falha Térmica gerado pela plataforma	60
6.9	Diagnóstico de Descarga Parcial gerado pela plataforma	61
6.10	Relatório de transformador exportado em formato PDF	63

6.11	Relatório de geral exportado em formato PDF	64
6.12	Nota da plataforma PowerTam na escala SUS.	65

LISTA DE TABELAS

3.1	Interpretação dos Valores dos Gases pela Norma IEC 60599.	26
6.1	Pontuações individuais obtidas no questionário SUS	65
25	Afirmações da Escala SUS incluídas no formulário	98

LISTA DE QUADROS

2.1.1 Comparativo entre trabalhos relacionados e a proposta atual	20
4.1 Requisitos Funcionais do Sistema	36
4.2 Requisitos Não Funcionais do Sistema	37
4.3 Casos de Uso	39

LISTA DE ABREVIATURAS

API	<i>Application Programming Interface</i>
AGD	Análise de Gás Dissolvido
DDD	<i>Domain-Driven Design</i>
HTML	<i>HyperText Markup Language</i>
IA	Inteligência Artificial
JSON	<i>JavaScript Object Notation</i>
JWT	<i>JSON Web Token</i>
RBAC	<i>Role-Based Access Control</i>
REST	<i>Representational State Transfer</i>
RF	Requisito Funcional
RNF	Requisito Não-Funcional
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SPA	<i>Single-page Application</i>
SQL	<i>Structured Query Language</i>
SUS	<i>System Usability Scale</i>
TP	Transformador de Potência

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é algo essencial para o dia a dia da sociedade moderna, sendo indispensável para o funcionamento de várias áreas da sociedade (SILVA; GUIMARÃES, 2012). Há uma sinergia entre os sistemas de geração, transmissão e distribuição para que a energia chegue com qualidade ao consumidor final respeitando os padrões exigidos pelos órgãos reguladores. O não cumprimento desses padrões pode resultar na aplicação de sanções e penalidades às concessionárias responsáveis pelo fornecimento (MENDONÇA, 2016).

Dentre os equipamentos fundamentais para o funcionamento eficiente do sistema elétrico, destacam-se os transformadores de potência (TPs), pois são responsáveis por modificar os níveis de tensão das linhas de transmissão, permitindo a redução de perdas durante o transporte da energia (NOGUEIRA; ALVES, 2009). A falha de um TP, especialmente os de grande porte instalados em subestações, pode comprometer o fornecimento de eletricidade em determinada região, ocasionando além dos danos operacionais, danos econômicos e sociais com a falta de energia.

Figura 1.1: Transformador de potência trifásico.



Fonte: Globecore (2026)

Para mitigar tais riscos, as empresas do setor elétrico adotam rotinas e protocolos de monitoramento do desempenho desses equipamentos. Segundo Bessa et al. (2023), a Análise de Gás Dissolvido (AGD) é o método mais utilizado para diagnóstico de falhas internas em transformadores, sendo padronizada internacionalmente pela norma

IEC 60599. Essa técnica permite identificar falhas incipientes a partir da interpretação da quantidade de certos gases presentes no fluido dielétrico do TP. Porém, apesar de ser largamente utilizada, a AGD não garante um diagnóstico 100% preciso, mas pode ser complementado utilizando-se de técnicas mais sofisticadas.

Com os avanços nas últimas décadas em inteligência artificial (IA), novos métodos têm sido desenvolvidos para otimizar a detecção de falhas em TPs. Um deles, proposto por Lima (2013), propõe um algoritmo baseado em redes neurais autoassociativas para aprimorar o diagnóstico de falhas incipientes nesses equipamentos. Paralelamente, o mercado já dispõe de sondas modernas capazes de realizar a coleta e análise cromatográfica em tempo real, muitas das quais são compatíveis com protocolos de comunicação que permitem sua integração a sistemas de monitoramento remoto.

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma plataforma *web* para auxiliar a gestão de transformadores de potência de uma companhia de energia elétrica. A solução proposta permitirá o cadastramento de TPs, a inserção e importação de análises cromatográficas e a geração de relatórios de diagnósticos. A plataforma se baseará nos critérios da norma IEC 60599 e no método proposto por Lima (2013), proporcionando um sistema mais confiável para o monitoramento e indicação de manutenção preditiva dos TPs.

1.1 Objetivos da Monografia

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma plataforma *web* baseada na arquitetura cliente-servidor para o monitoramento de TPs, capaz de diagnosticar falhas incipientes utilizando a norma IEC 60599 e o método de Redes Neurais Autoassociativas proposto por Lima (2013).

Para alcançar o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar o levantamento bibliográfico sobre transformadores de potência, análise de gases dissolvidos e algoritmos de diagnóstico de falhas.
- Modelar a arquitetura do sistema, definindo os requisitos funcionais e não funcionais, bem como os diagramas de casos de uso e de banco de dados.

- Implementar a plataforma web (API e Interface de Usuário), integrando os algoritmos para duplo diagnóstico.
- Validar a solução proposta por meio de testes funcionais e avaliação de usabilidade junto a potenciais usuários.

1.2 Estrutura do Trabalho

Esta monografia está organizada em sete capítulos. O Capítulo 2 apresenta os trabalhos relacionados. O Capítulo 3 aborda a fundamentação teórica sobre transformadores e métodos de diagnóstico. O Capítulo 4 detalha a modelagem e a engenharia de requisitos do sistema. O Capítulo 5 descreve a implementação da plataforma. O Capítulo 6 apresenta as telas do sistema, os resultados dos testes funcionais e avaliação de usabilidade. Por fim, o Capítulo 7 traz as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

2 TRABALHOS RELACIONADOS

Neste capítulo é apresentada a análise de pesquisas relevantes sobre o desenvolvimento de sistemas para diagnóstico de falhas em TPs. Os trabalhos apresentados são os que possuem ênfase em abordagens que integram a AGD e métodos de inteligência computacional e soluções de *software*.

Foi observado que, ao longo das últimas décadas, surgiram pesquisas nacionais e internacionais relacionadas à automatização desse diagnóstico, aplicando desde modelos matemáticos normativos (IEC 60599) até técnicas avançadas como redes neurais artificiais e lógica *fuzzy*. A seguir, cada trabalho é analisado quanto à metodologia e resultados, destacando as diferenças em relação à plataforma proposta nesta monografia.

Batista (2022)

Título: *Diagnóstico de Falhas Incipientes em Transformadores de Potência Baseado na Análise de Gases Dissolvidos no Óleo Isolante Empregando Redes Neurais Artificiais.*

Batista (2022) propõe um sistema automatizado que faz a interpretação da norma IEC 60599 utilizando Redes Neurais Artificiais (RNA). O Autor construiu uma base de dados própria e comparou a eficiência de 12 algoritmos de treinamento no MATLAB. **Análise comparativa:** O autor foca na eficácia do modelo preditivo isolado. Em contrapartida, esta monografia não visa apenas a implementação do algoritmo, mas o desenvolvimento de uma solução completa (algoritmo e interface de usuário) com gestão de histórico e relatórios, preenchendo a lacuna de usabilidade e gestão.

Wang et al. (2021)

Título: *Power Transformer Fault Diagnosis System Based on Internet of Things.*

Este estudo desenvolveu um sistema baseado em Internet das Coisas (IoT) e Teoria da Extensão para fusão de dados de sensores. Utilizando comunicação GPRS e sensores embarcados, o modelo obteve 95,6% de acerto. **Análise comparativa:** O trabalho de

Wang et al. (2021) tem um foco em hardware/embarcados. O sistema aqui proposto difere ao focar na camada de *software* e visualização *web*, sendo agnóstico ao *hardware* de coleta (recebe dados manuais via interface de usuário ou API), o que facilita sua adoção imediata sem troca de equipamentos físicos.

Elsisi et al. (2022)

Título: *Effective IoT-based deep learning platform for online fault diagnosis of power transformers against cyberattacks and data uncertainties.*

Elsisi et al. (2022) apresentam uma plataforma baseada em *Deep Learning* (CNN-1D) e IoT, com foco em segurança cibernética, superando métodos tradicionais como IEC e Rogers. **Análise comparativa:** O trabalho de Elsisi et al. (2022) baseia-se em soluções proprietárias (CONTACT Software, 2025). A plataforma desenvolvida nesta pesquisa destaca-se por ser de código aberto e modular, permitindo que a concessionária personalize o sistema e integre novos algoritmos sem dependência de fornecedores externos.

Baker, Nese e Dursun (2023)

Título: *Hybrid Condition Monitoring System for Power Transformer Fault Diagnosis.*

Por fim, Baker, Nese e Dursun (2023) apresentam um sistema híbrido (AGD + *Fuzzy* + SVM) implementado em LabVIEW e MATLAB. **Análise comparativa:** A solução de Baker é voltada para instrumentação e simulação em ambiente de laboratório. A presente proposta busca transpor essas validações acadêmicas para uma aplicação *web* comercialmente viável que possa ser usada no ambiente operacional, com foco na arquitetura Cliente-Servidor.

2.1 Síntese Comparativa

Para melhor visualizar as contribuições deste trabalho frente ao estado da arte, o Quadro 2.1.1 resume as principais características dos trabalhos analisados.

Quadro 2.1.1: Comparativo entre trabalhos relacionados e a proposta atual

Autor/Ano	Técnica Principal	Plataforma	Diferencial desta Monografia
Batista (2022)	Redes Neurais	Modelo Matemático	Integração do modelo em sistema de gestão completo.
Wang (2021)	IoT + Teoria da Extensão	Embarcado/GPRS	Foco na Interface do Usuário e independência de hardware.
Elsisi (2022)	Deep Learning	IoT/Proprietário	Código Aberto e foco em Usabilidade (SUS).
Baker (2023)	SVM + Fuzzy	LabVIEW/Matlab	Migração de ambiente de simulação para aplicação real.
Este Trabalho	LIMA (2013) + IEC	Web (React/-Node)	

Fonte: O Autor (2026).

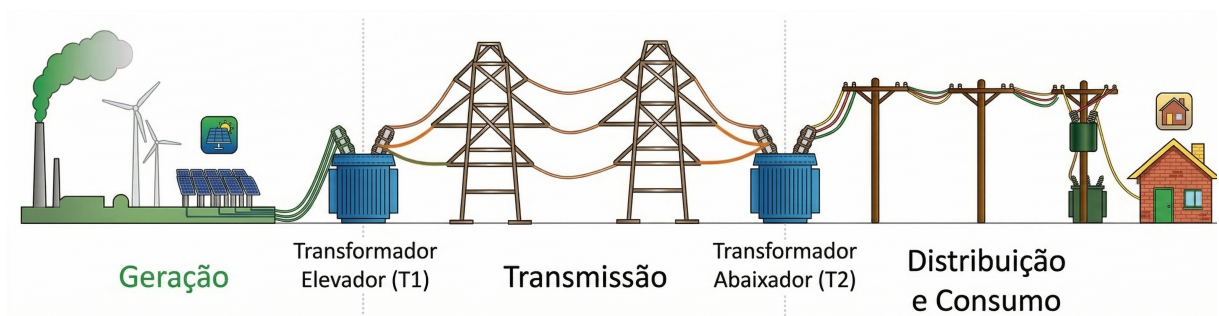
3 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta o embasamento teórico para a modelagem e implementação da plataforma PowerTam. Inicialmente, aborda-se o funcionamento dos TPs, em seguida a AGD e a descrição da norma IEC 60599 e o método proposto por Lima (2013). Por fim, são apresentados os conceitos de Engenharia de *Software* utilizados neste trabalho, concluindo com as métricas da escala *System Usability Scale* (SUS) que nortearam a validação da interface.

3.1 Transformadores de Potência

Os transformadores de potência desempenham um papel essencial na conversão de níveis de tensão elétrica, permitindo a transmissão de energia a longas distâncias com mínimas perdas. Ao elevar a tensão nas usinas geradoras, reduz-se a corrente elétrica necessária para transportar a mesma quantidade de energia, minimizando as perdas Joule nos condutores (UMANS, 2014). A Figura 3.1 ilustra a integração desses ativos no Sistema Elétrico de Potência (SEP), desde a geração até o consumo final.

Figura 3.1: Representação do SEP e a atuação dos TPs



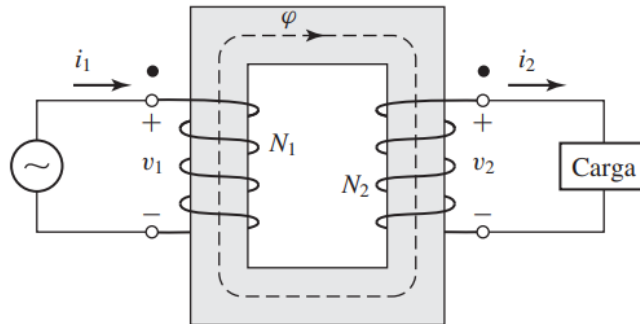
Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com auxílio de Inteligência Artificial.

Nesse contexto, os TPs instalados em subestações representam os ativos de maior relevância técnica e econômica do sistema. Esses equipamentos atuam como nós estratégicos na rede, conectando os segmentos de geração, transmissão e distribuição, sendo responsáveis pela adequação dos níveis de tensão para o transporte eficiente de grandes quantidades de energia. Devido à sua operação em altas tensões e potências

elevadas, os transformadores de subestação são considerados equipamentos de capital intensivo e de longa vida útil (FRONTIN, 2013). A sua confiabilidade é determinante para a continuidade do fornecimento energético, pois uma falha em um TP pode acarretar em interrupções de larga escala (*blackouts*), severos prejuízos financeiros e penalidades regulatórias para as concessionárias.

O funcionamento dos transformadores baseia-se no princípio da indução eletromagnética descrito por Faraday, conforme ilustrado na Figura 3.2. Esse princípio estabelece que uma variação do campo magnético no núcleo induz uma corrente elétrica nos enrolamentos secundários. Esses equipamentos são compostos por um núcleo ferromagnético e enrolamentos de cobre ou alumínio, denominados primário e secundário, cuja relação de espiras define a razão de transformação da tensão (UMANS, 2014). Um fator crítico para o desempenho e longevidade dos transformadores é o isolamento dielétrico, geralmente composto por óleo mineral ou materiais sintéticos, que protege os enrolamentos contra descargas elétricas e atua na dissipação térmica (OLIVEIRA, 2021).

Figura 3.2: Esquema funcional de um transformador destacando o núcleo e enrolamentos



Fonte: Adaptado de Umans (2014).

Entretanto, a integridade desse sistema de isolamento é constantemente desafiada durante a operação do equipamento. O óleo e o papel isolante estão sujeitos a estresses térmicos, elétricos e mecânicos contínuos, que atuam como catalisadores para processos de degradação interna, cujas consequências físicas podem resultar em danos severos, como a carbonização exemplificada na Figura 3.3. É justamente a resistência desses materiais ao longo do tempo que determina, em grande parte, a confiabilidade operacional do ativo (OLIVEIRA, 2021).

Figura 3.3: Danos catastróficos por superaquecimento e carbonização nos enrolamentos de um transformador



Fonte: Electrical Engineering Portal (2016).

Diante desse cenário de degradação progressiva, torna-se imperativo realizar o monitoramento periódico do sistema de isolamento. Como as falhas incipientes — sejam térmicas ou elétricas — provocam a decomposição química do dielétrico liberando gases específicos, a análise desses subprodutos no óleo isolante constitui a principal ferramenta de diagnóstico preditivo. Tal prática permite identificar anomalias em estágios iniciais, viabilizando intervenções planejadas antes que ocorram falhas (BESSA et al., 2023).

3.2 Análise de Gases Dissolvidos

A AGD destaca-se como uma das principais ferramentas para o monitoramento e diagnóstico de falhas incipientes em transformadores de potência. A decomposição térmica e elétrica dos materiais isolantes do TP em operação gera diferentes tipos de gases no óleo isolante. Assim, a medição e a interpretação da concentração desses gases dissolvidos permitem identificar problemas internos específicos de forma precoce.

Os principais gases monitorados na AGD incluem:

- Hidrogênio (H_2) – Associado a descargas parciais e outras falhas elétricas de baixa

energia;

- Metano (CH_4) – Relacionado a descargas elétricas de baixa energia e sobreaquecimentos moderados;
- Etano (C_2H_6) e Etileno (C_2H_4) – Indicadores de falhas térmicas;
- Acetileno (C_2H_2) – Forte indicativo de arcos elétricos;
- Monóxido de carbono (CO) e Dióxido de carbono (CO_2) – Relacionados à degradação da isolamento celulósica.

A correta interpretação desses gases e suas proporções permite determinar se o transformador opera dentro de parâmetros normais ou se há indícios de falhas.

Apesar de existirem diversos métodos normatizados que são utilizados para interpretar os resultados da AGD, este trabalho tratará do método proposto na norma **IEC 60599** e do método proposto por **LIMA, 2013**.

3.2.1 IEC 60599

O método IEC 60599 enumera 6 tipos de falhas, descritas abaixo.

As **falhas elétricas** ocorrem devido à degradação das propriedades dielétricas dos materiais isolantes sob estresse de alta tensão. Elas são subdivididas em:

Descargas Parciais (PD) Ocorrem quando há uma ionização localizada dentro do sistema isolante do transformador, sem que haja uma falha dielétrica completa. Esse fenômeno pode ser causado por defeitos na isolação, umidade excessiva ou contaminação do óleo isolante. As descargas parciais produzem hidrogênio (H_2) e pequenas quantidades de metano (CH_4), sendo um indicativo inicial de deterioração do isolamento.

Descargas Elétricas de Baixa Energia (D1) Ocorrem quando há falhas dielétricas incipientes dentro do transformador, podendo envolver pequenos curtos circuitos ou faíscas entre componentes. Esse tipo de falha gera metano (CH_4), etileno (C_2H_4) e traços de acetileno (C_2H_2), mas sem uma fusão significativa dos materiais condutores. Embora a falha ainda não seja severa, pode evoluir para estágios mais críticos.

Descargas Elétricas de Alta Energia (D2) Esse tipo de falha ocorre quando há arcos elétricos intensos dentro do transformador, resultando na fusão de condutores e degradação severa do sistema isolante. As descargas elétricas de alta energia produzem grandes quantidades de acetileno (C_2H_2) e hidrogênio (H_2), indicando um risco elevado de falha catastrófica. Se não forem identificadas e corrigidas a tempo, essas falhas podem levar à destruição completa do equipamento.

As **falhas térmicas**, por sua vez, resultam do aquecimento excessivo do óleo ou do papel, geralmente causadas por sobrecargas, bloqueio no fluxo de refrigeração ou contatos defeituosos. A norma as classifica conforme a temperatura de operação:

Falhas Térmicas de Baixa Temperatura (T1) As falhas térmicas de baixa temperatura ocorrem quando há um aquecimento anormal em componentes internos do transformador, mas sem carbonização severa do óleo isolante. Esse tipo de falha pode ser causado por conexões soltas, sobrecarga leve ou ventilação insuficiente. Os gases típicos produzidos incluem metano (CH_4) e etano (C_2H_6), sendo um alerta para a necessidade de manutenção preventiva.

Falhas Térmicas de Média Temperatura (T2) As falhas térmicas de média temperatura envolvem temperaturas entre $300^{\circ}C$ e $700^{\circ}C$, resultando na decomposição mais pronunciada do óleo isolante e na possível carbonização parcial do isolamento. Esse tipo de falha pode ser causado por superaquecimento em enrolamentos ou em conexões defeituosas. Os gases formados incluem etileno (C_2H_4), metano (CH_4) e etano (C_2H_6), sugerindo a necessidade de ações corretivas para evitar um agravamento da situação.

Falhas Térmicas de Alta Temperatura (T3) Esse tipo de falha ocorre quando há um superaquecimento severo, com temperaturas acima de $700^{\circ}C$. O calor extremo pode levar à degradação intensa do óleo isolante e à formação de depósitos de carbono nos componentes internos. Essa condição frequentemente está associada a sobrecargas críticas, falhas nos circuitos de resfriamento ou problemas estruturais graves. Os gases predominantes são etileno (C_2H_4) e acetileno (C_2H_2), sendo um forte indicativo de risco iminente de falha total.

Para fazer o diagnóstico da análise dos gases, o método IEC 60599 possui regras definidas interpretação (Tabela 3.1), que leva em consideração o valor de três relações

Tabela 3.1: Interpretação dos Valores dos Gases pela Norma IEC 60599.

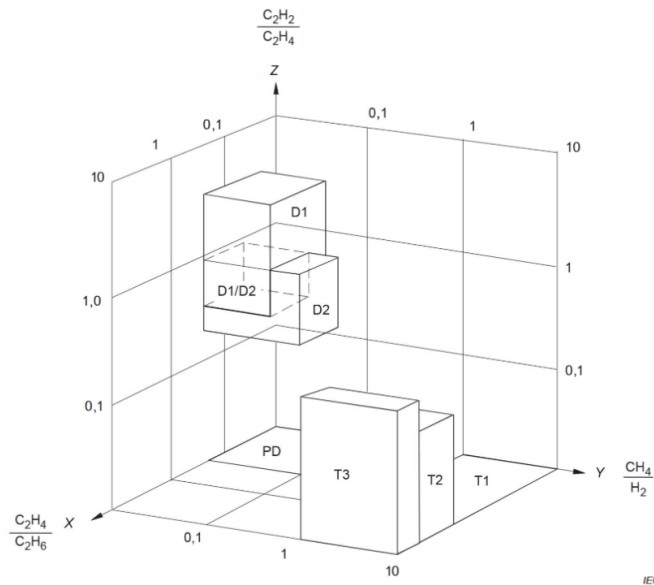
Código	Falha	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6
PD	Descargas Parciais	NS	$< 0,1$	$< 0,2$
D1	Descarga de Baixa Energia	> 1	entre 0,1 e 0,5	> 1
D2	Descarga de Alta Energia	entre 0,6 e 2,5	entre 0,1 e 1	> 2
T1	Falha Térmica $< 300^\circ\text{C}$	NS	> 1 (NS)	< 1
T2	Falha Térmica $300^\circ\text{C} - 700^\circ\text{C}$	$< 0,1$	> 1	entre 1 e 4
T3	Falha Térmica $> 700^\circ\text{C}$	$< 0,2$	> 1	> 4

NS: Não Significativo

Fonte: IEC 60599

dos gases. Apesar de amplamente adotado, sua precisão pode ser limitada em casos de falhas múltiplas ou em situações onde os gases dissolvidos não seguem os padrões típicos estabelecidos na norma. A Figura 3.4 demonstra graficamente os limites de capacidade de diagnóstico da norma IEC 60599.

Figura 3.4: Representação gráfica das relações dos gases e das falhas detectadas.



Fonte: IEC 60599

3.2.2 Método Baseado em Redes Neurais (Lima, 2013)

O método proposto por Lima (2013) para o diagnóstico de falhas em transformadores de potência apresenta uma abordagem baseada em técnicas de inteligência artificial. Diferente da norma IEC 60599, que utiliza razões fixas entre gases para identificar falhas, o método de Lima faz uso de redes neurais autoassociativas e do algoritmo *Mean Shift*, permitindo uma análise mais precisa e adaptável das condições do transformador.

Essas redes neurais são treinadas para reconhecer padrões de gases dissolvidos associados a cinco diferentes tipos de falhas e condições de normalidade. Cada estado de operação (falha ou normal) possui uma rede neural especializada em sua detecção. No total, há cinco redes neurais para falhas, e duas adicionais dedicadas a identificar condições normais do transformador. Durante o processo de classificação, os valores dos gases medidos são fornecidos às redes neurais. A rede que apresentar o menor erro na saída determina a classificação final da amostra.

O método de Lima consegue identificar condições de operação idênticas ao método IEC 60599, com uma particularidade nas falhas térmicas. Enquanto a IEC 60599 divide essas falhas em três níveis (T1, T2 e T3), o método de Lima classifica como T2 qualquer falha térmica acima de 300°C, englobando o que a IEC 60599 define individualmente como T2 e T3.

As condições de operação identificadas pelo método de Lima são:

- **Operação Normal:** Equipamento sem evidências de falhas incipientes;
- **Descargas Parciais (PD):** Equivalente à falha PD da IEC 60599;
- **Descargas de Baixa Energia (D1):** Equivalente à falha D1 da IEC 60599;
- **Descargas de Alta Energia (D2):** Equivalente à falha D2 da IEC 60599;
- **Falha Térmica de Baixa Temperatura (T1):** Equivalente à falha T1 da IEC 60599;
- **Falha Térmica de Alta Temperatura (T2):** Equivalente às falhas T2 e T3 da IEC 60599.

3.3 Engenharia de Software Moderna

O desenvolvimento de sistemas modernos para ambientes críticos, como o monitoramento de ativos elétricos, exige a adoção de padrões de projeto que garantam a robustez, a testabilidade e a facilidade de manutenção do *software*. Esta seção apresenta os fundamentos teóricos da engenharia de *software* utilizados na construção da plataforma.

3.3.1 Domain-Driven Design (DDD)

O *Domain-Driven Design* (DDD), ou Projeto Orientado ao Domínio, é uma abordagem de desenvolvimento de software voltada para atender necessidades de negócios complexos. Proposto por Evans (2003), o DDD defende que o foco principal do projeto deve ser o “Domínio” (a esfera de conhecimento do problema) e a “Lógica do Domínio”, em vez de detalhes técnicos de infraestrutura.

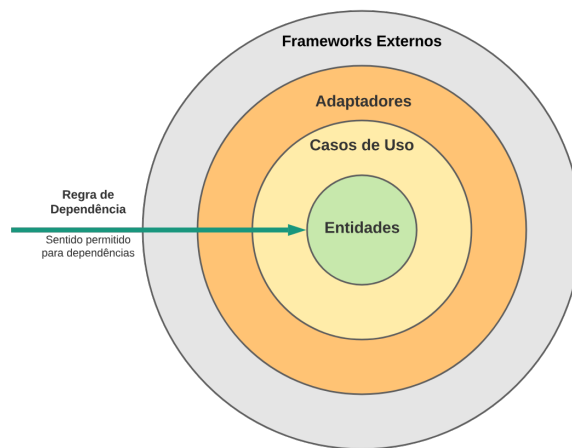
Dois conceitos centrais do DDD aplicados neste trabalho são:

- **Linguagem Ubíqua:** A criação de uma linguagem comum e rigorosa compartilhada entre desenvolvedores e especialistas do negócio. No código-fonte, isso é exemplificado pelo uso de termos técnicos do diagnóstico de transformadores em classes e métodos, como `GasConcentration` (Concentração de Gases), e tipos de falhas como `PD` (Descargas Parciais), `D1/D2` (Descargas de Baixa/Alta Energia) e `T1/T2/T3` (Falhas Térmicas) presentes no classificador da norma IEC 60599.
- **Contextos Delimitados (*Bounded Contexts*):** A divisão do sistema em fronteiras lógicas onde cada contexto tem uma responsabilidade bem definida. Por exemplo, esta aplicação foi organizada nos seguintes contextos principais:
 - ***Identity* (Identidade):** Focado na gestão de `User` (Usuários), `Role` (Papéis) e permissões de acesso.
 - ***Transformer-Diagnosis* (Diagnostico de Transformadores):** Onde reside a lógica central de diagnóstico, processando `GasConcentration` e aplicando algoritmos de classificação de falhas.
 - ***Reports* (Relatórios):** Contexto responsável pela geração e armazenamento de relatórios técnicos, tratando os dados de diagnóstico como registros históricos para o usuário.

3.3.2 *Clean Architecture* (Arquitetura Limpa)

Para estruturar o código de forma desacoplada, utilizou-se o conceito de *Clean Architecture*, proposto por Martin (2017). O objetivo dessa arquitetura é a separação de responsabilidades, organizando o sistema em camadas concêntricas.

Figura 3.5: Ilustração das camadas da Arquitetura Limpa e a Regra de Dependência.



Fonte: Martin (2017)

A regra de dependência é o princípio fundamental: as dependências de código-fonte devem apontar apenas para dentro, em direção às regras de negócio de nível superior. No sistema desenvolvido, isso é garantido através do uso de interfaces de repositório localizadas na camada de Domínio, conforme exemplificado no código abaixo:

```
1 // Localizacao: software/backend/src/transformer-diagnosis/domain/  
  repositories/measurement-repository.ts  
2  
3 interface MeasurementRepository {  
4   save(measurement: Measurement): Promise<void>;  
5   findById(id: string): Promise<Measurement | null>;  
6   delete(measurement: Measurement): Promise<void>;  
7   // ... outros metodos de contrato  
8 }
```

Listing 3.1: Interface de repositório definida na camada de Domínio

Como observado, a interface `MeasurementRepository` define apenas o comportamento esperado para a persistência de dados, sem depender de detalhes técnicos como o banco de dados *PostgreSQL* ou o *Prisma ORM*. A camada de Aplicação (responsável

pelos casos de uso), por sua vez, consome essa interface através da injeção de dependência no construtor de seus casos de uso, mantendo-se independente da implementação final:

```
1 // Localizacao: software/backend/src/transformer-diagnosis/application/  
   use-cases/measurements/register-measurement.ts  
2  
3 class RegisterMeasurementUseCase extends UseCase<Params, Result> {  
4   constructor(  
5     private readonly authorizationService: AuthorizationService,  
6     private readonly transformerRepository: TransformerRepository, //  
       Dependencia de interface  
7     private readonly measurementService: MeasurementService  
8   ) {  
9     super();  
10  }  
11  
12  async execute({ transformerId, data }: Params): Promise<Result> {  
13    // A l g i c a de neg cio chama o m todo da interface sem saber como  
       os dados s o salvos  
14    const transformer = await this.transformerRepository.findById(  
       transformerId);  
15    // ... restante da logica  
16  }  
17 }
```

Listing 3.2: Uso da interface no Caso de Uso (Aplicação)

Essa abordagem permite que o sistema seja testável sem depender da interface de usuário ou do banco de dados, visto que a implementação concreta (`PrismaMeasurementRepository`) pode ser alterada sem impactar as regras de negócio.

3.3.3 Arquitetura de Aplicações Web Modernas

A plataforma foi projetada seguindo o modelo de sistemas distribuídos na *web*, separando a aplicação em duas camadas principais: *Frontend* e *Backend*.

API RESTful

O *Backend* expõe suas funcionalidades através de uma API (*Application Programming Interface*) baseada na arquitetura REST (*Representational State Transfer*). Segundo

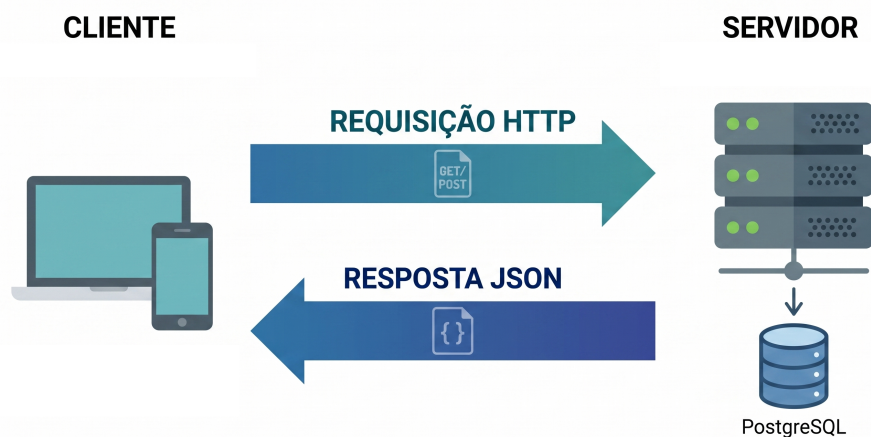
Fielding (2000), o REST define um conjunto de restrições arquiteturais que promovem a escalabilidade e a comunicação padronizada entre sistemas heterogêneos, utilizando os verbos do protocolo HTTP (GET, POST, PUT, DELETE) para manipulação de recursos.

Single Page Applications (SPA)

Para a interface do usuário (*Frontend*), adotou-se o modelo de *Single Page Application* (SPA). Diferente das aplicações *web* tradicionais que recarregam a página inteira a cada interação, uma SPA carrega uma única página HTML e atualiza dinamicamente o conteúdo conforme a interação do usuário, proporcionando uma experiência mais fluida e semelhante a aplicativos *desktop* (MIKOWSKI; POWELL, 2013).

A interação entre essas duas camadas ocorre de forma assíncrona: o usuário interage com a interface React, que dispara requisições HTTP para a API REST. O servidor processa a solicitação e retorna uma resposta, geralmente em formato JSON (*JavaScript Object Notation*), permitindo que a SPA atualize a interface sem a necessidade de recarregar o navegador. A Figura 3.6 ilustra esse fluxo de comunicação.

Figura 3.6: Dinâmica de comunicação entre Cliente Frontend (SPA) e Servidor Backend (API REST)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.3.4 Principais Bibliotecas Utilizadas

Todas as bibliotecas abaixo foram escolhidas, além de por sua justificativas técnica, por serem *open source*.

Para a construção da interface do usuário, optou-se pela biblioteca **React**. A escolha justifica-se pela sua arquitetura baseada em componentes, que favorece a reutilização de código e facilita a manutenção de interfaces complexas, alinhando-se ao requisito de arquitetura SPA.

Para a persistência de dados, utilizou-se o **Prisma ORM**. Diferente de abordagens tradicionais baseadas em strings SQL puras, o Prisma oferece segurança de tipos (*type-safety*) integrada ao TypeScript (linguagem adotada no projeto), prevenindo erros de sintaxe em tempo de desenvolvimento e abstraindo a complexidade das consultas ao banco de dados PostgreSQL.

A validação de dados da API foi implementada utilizando a biblioteca **Zod**. Essa ferramenta permite a declaração de esquemas seguros para as entradas e saídas da API, garantindo que dados inválidos (como medições de gases negativas) sejam rejeitados antes de serem processados pelas regras de negócio.

Para o requisito funcional de geração de relatórios em PDF, empregou-se a biblioteca **Puppeteer**. Essa ferramenta permite renderizar páginas HTML completas em um navegador *headless* no servidor, convertendo o resultado visual diretamente para arquivos PDF com alta fidelidade.

3.4 Engenharia de Usabilidade

No contexto de sistemas interativos a usabilidade é definida pela norma ABNT NBR ISO 9241-11 como a medida na qual um produto pode ser utilizado por usuários específicos para alcançar objetivos determinados com **eficácia**, **eficiência** e **satisfação**, dentro de um **contexto de uso específico**. A norma indica que a usabilidade não é uma propriedade estática do *software*, mas sim uma qualidade que emerge da interação entre o usuário, as tarefas executadas e o ambiente operacional. (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018)

Para o planejamento e a validação do sistema, a norma define seus pilares como:

- **Eficácia:** a acurácia e a completude com que os usuários atingem seus objetivos operacionais;
- **Eficiência:** o montante de recursos (tempo, esforço cognitivo, etc.) despendido para realizar as tarefas;
- **Satisfação:** a ausência de desconforto e a presença de atitudes positivas do usuário ao interagir com a interface.

Para mensurar sistematicamente o pilar da satisfação, assim como a eficácia e eficiência percebidas pelo usuário, adota-se o questionário *System Usability Scale* (SUS), desenvolvido por John Brooke em 1986 e publicado oficialmente em 1996. O SUS é uma escala psicométrica consolidada na literatura para avaliações ágeis de usabilidade. O instrumento consiste em dez afirmações de valência alternada (proposições positivas e negativas), onde o participante manifesta seu grau de concordância por meio de uma escala Likert de cinco pontos, variando de “discordo totalmente” (1) a “concordo totalmente” (5). (BROOKE, 1996)

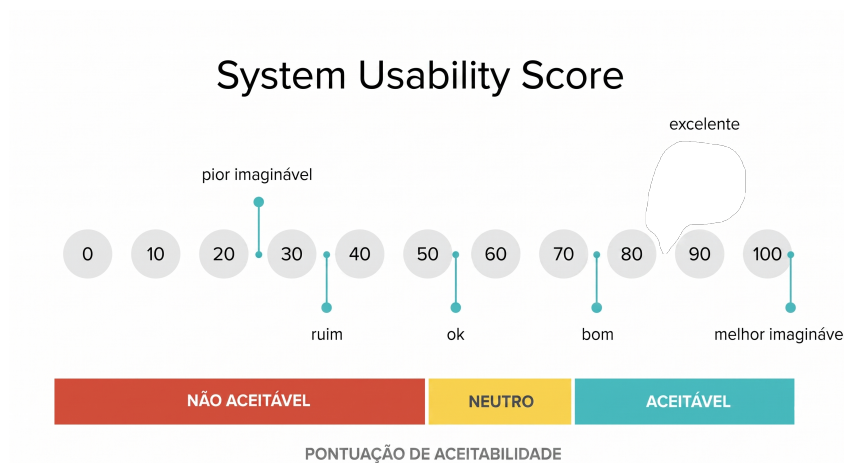
O cálculo do *score* final do SUS normaliza as respostas para gerar um índice global que varia de 0 a 100. A conversão matemática é realizada seguindo as seguintes regras:

- Para as afirmações ímpares (positivas), subtrai-se 1 da nota atribuída pelo usuário ($X - 1$);

- Para as afirmações pares (negativas), subtrai-se a nota atribuída pelo usuário do valor 5 ($5 - X$).

Após a transformação individual, somam-se as pontuações das dez afirmações e multiplica-se o resultado por 2,5. Embora o resultado final se apresente em uma escala centesimal, o *score* obtido não deve ser interpretado como uma porcentagem. Na literatura de engenharia de usabilidade, estabeleceu-se o valor de 68 pontos como a média de mercado (*benchmark*). Pontuações iguais ou superiores a este patamar indicam que o *software* possui uma usabilidade aceitável e uma interface intuitiva para o público-alvo (como indicado graficamente na Figura 3.7) (BANGOR; KORTUM; MILLER, 2008).

Figura 3.7: Escala SUS



Fonte: Bangor, Kortum e Miller (2008)

4 MODELAGEM DA PLATAFORMA

Este capítulo apresenta a modelagem do sistema, utilizando os padrões estabelecidos pela engenharia de *software*. Primeiramente, são descritos os requisitos do sistema, abrangendo tanto os requisitos funcionais (RFs) quanto os não-funcionais (RNFs). Em seguida, são definidos os atores envolvidos e os respectivos casos de uso do sistema e apresentados os diagramas estruturais e comportamentais que ilustram a arquitetura e o funcionamento do sistema. Por fim é feita a estruturação do teste de usabilidade da aplicação.

4.1 Requisitos do Sistema

Os requisitos do sistema são especificações essenciais para garantir que a plataforma atenda às necessidades funcionais e não funcionais estabelecidas. Os RFs descrevem as funcionalidades que o sistema deve executar, como o cadastro de TPs, a importação de dados cromatográficos e a geração de diagnósticos baseados nos métodos IEC 60599 e LIMA. Já os RNFs especificam aspectos como desempenho, segurança, tecnologias, escalabilidade e usabilidade, assegurando que a solução desenvolvida seja confiável, eficiente e adaptável às necessidades operacionais.

4.1.1 Requisitos Funcionais do Sistema

Esta subseção apresenta o detalhamento das funções que a plataforma PowerTam deve executar para atender às necessidades operacionais dos usuários. O mapeamento abrange de forma integrada os módulos de segurança e controle de acesso baseado em papéis (RBAC), a gestão dos ativos e medições, e as rotinas de geração de relatórios técnicos.

O Quadro 4.1 contém os RFs elucidados.

Quadro 4.1: Requisitos Funcionais do Sistema

Código	Requisito Funcional	Descrição
RF01	Gerenciamento de TPs	Cadastrar, editar, visualizar, listar com filtro e excluir TPs validando dados técnicos, localização e status operacional.
RF02	Gerenciamento de Medições	Registrar, editar, visualizar, listar com filtro e excluir concentrações de gases dissolvidos e dados de umidade atrelados a um TP.
RF03	Duplo Diagnóstico	Gerar diagnóstico automático de falhas baseado no método IEC 60599 e as Redes Neurais Artificiais proposta por Lima (2013).
RF04	Geração de Relatórios	Emitir relatórios analíticos com gráficos de evolução e tendências de gases no tempo.
RF05	Exportação de Relatórios	Exportar laudos e relatórios técnicos individualizados em formato PDF.
RF06	Autenticação de Usuários	Controlar o login seguro na plataforma utilizando e-mail, senha e tokens JWT.
RF07	Recuperação de Senha	Permitir a redefinição de credenciais de acesso através de fluxo de validação por e-mail.
RF08	Gerenciamento de Usuários	Cadastrar, listar, editar e desativar contas de usuários do sistema.
RF09	Gerenciamento de Papéis	Cadastrar papéis de acesso (ex: Técnico, Estagiário) com atribuição de permissões granulares, listar, editar e excluir.
RF10	Visualização de Dashboard	Apresentar painel com indicadores globais da frota TPs.

Fonte: O Autor (2026).

4.1.2 Requisitos Não-Funcionais do Sistema

Esta subseção apresenta as restrições técnicas, operacionais e de qualidade estabelecidas para a plataforma PowerTam. O mapeamento prioriza critérios de arquitetura, pilhas tecnológicas, usabilidade, segurança e manutenibilidade, conforme detalhado no Quadro 4.2.

Quadro 4.2: Requisitos Não Funcionais do Sistema

Código	Categoria	Descrição
RNF01	Arquitetura	O sistema deve seguir a arquitetura cliente-servidor.
RNF02	Arquitetura	O sistema deve ser API-First.
RNF03	Arquitetura	Divisão em dois projetos principais: Backend e Frontend.
RNF04	Arquitetura - Backend	Implementado na linguagem TypeScript e executando em ambiente Node.js.
RNF05	Arquitetura - Backend	Seguir o padrão REST para expor seus serviços.
RNF06	Arquitetura - Backend	O sistema deve adotar uma arquitetura desacoplada em camadas (<i>Clean Architecture</i>), garantindo a independência entre a lógica de negócio e os detalhes de infraestrutura.
RNF07	Arquitetura - Backend	Utilizar banco de dados relacional PostgreSQL.
RNF08	Arquitetura - Frontend	Implementado em React.
RNF09	Arquitetura - Frontend	Estruturado como uma SPA.
RNF10	Arquitetura - Frontend	Implementado na linguagem TypeScript.
RNF11	Interface do Usuário (UI/UX)	Deve adotar o Material Design 3 como guia para os elementos visuais e interativos.

Código	Categoria	Descrição
RNF12	Interface do Usuário (UI/UX)	O sistema deve ser intuitivo e de fácil uso, com interface amigável e consistente para operadores e administradores.
RNF13	Segurança	Implementar autenticação e autorização seguras no backend, usando JWT.
RNF14	Segurança	Todas as comunicações entre cliente e servidor devem ser criptografadas com HTTPS.
RNF15	Segurança	Informações sensíveis e credenciais devem ser armazenadas de forma criptografada no banco de dados.
RNF16	Manutenibilidade	O código deve ser modular, organizado e bem documentado.
RNF17	Manutenibilidade	O backend deve possuir cobertura de testes automatizados para as camadas de domínio e aplicação, garantindo a integridade dos cálculos de diagnóstico da IEC 60599.
RNF18	Manutenibilidade	O frontend deve utilizar o sistema de gerenciamento de estado Context API nativo do React.

Fonte: O Autor (2026).

4.2 Casos de Uso

Os casos de uso do sistema foram organizados em cinco grupos principais, cada um representando um conjunto de funcionalidades relacionadas (Quadro 4.3). Esses grupos abrangem desde autenticação e controle de acesso até o gerenciamento de transformadores e medições, relatórios e visualização de *dashboards*.

Quadro 4.3: Casos de Uso

Código	Caso de Uso	Grupo
UC01	Autenticar Usuário	Autenticação e Controle de Acesso
UC02	Redefinir Senha de Usuário	Autenticação e Controle de Acesso
UC03	Cadastrar Usuário	Autenticação e Controle de Acesso
UC04	Listar Usuários	Autenticação e Controle de Acesso
UC05	Detalhar Usuário	Autenticação e Controle de Acesso
UC06	Editar Usuário	Autenticação e Controle de Acesso
UC07	Cadastrar Papel	Autenticação e Controle de Acesso
UC08	Listar Papéis	Autenticação e Controle de Acesso
UC09	Detalhar Papel	Autenticação e Controle de Acesso
UC10	Editar Papel	Autenticação e Controle de Acesso
UC11	Excluir Papel	Autenticação e Controle de Acesso
UC12	Cadastrar Transformador	Gerenciamento de Transformadores
UC13	Listar Transformadores	Gerenciamento de Transformadores
UC14	Detalhar Transformador	Gerenciamento de Transformadores
UC15	Editar Transformador	Gerenciamento de Transformadores
UC16	Excluir Transformador	Gerenciamento de Transformadores
UC17	Cadastrar Medição	Gerenciamento de Medições
UC18	Detalhar Medição	Gerenciamento de Medições
UC19	Editar Medição	Gerenciamento de Medições
UC20	Excluir Medições	Gerenciamento de Medições
UC21	Gerar Relatório de Diagnóstico de Transformador	Relatórios
UC22	Gerar Relatório Geral de Todos os Transformadores	Relatórios
UC23	Exportar Relatório em PDF	Relatórios
UC24	Visualizar Dashboard	Dashboard

Fonte: O Autor (2026).

Os casos de uso foram organizados individualmente em quadros descritivos. A seguir está o exemplo do quadro do caso de uso **UC12 - Cadastrar Transformador**. Os demais estão descritos no Apêndice 7.2.

4.3 (Exemplo) UC12 - Cadastrar Transformador

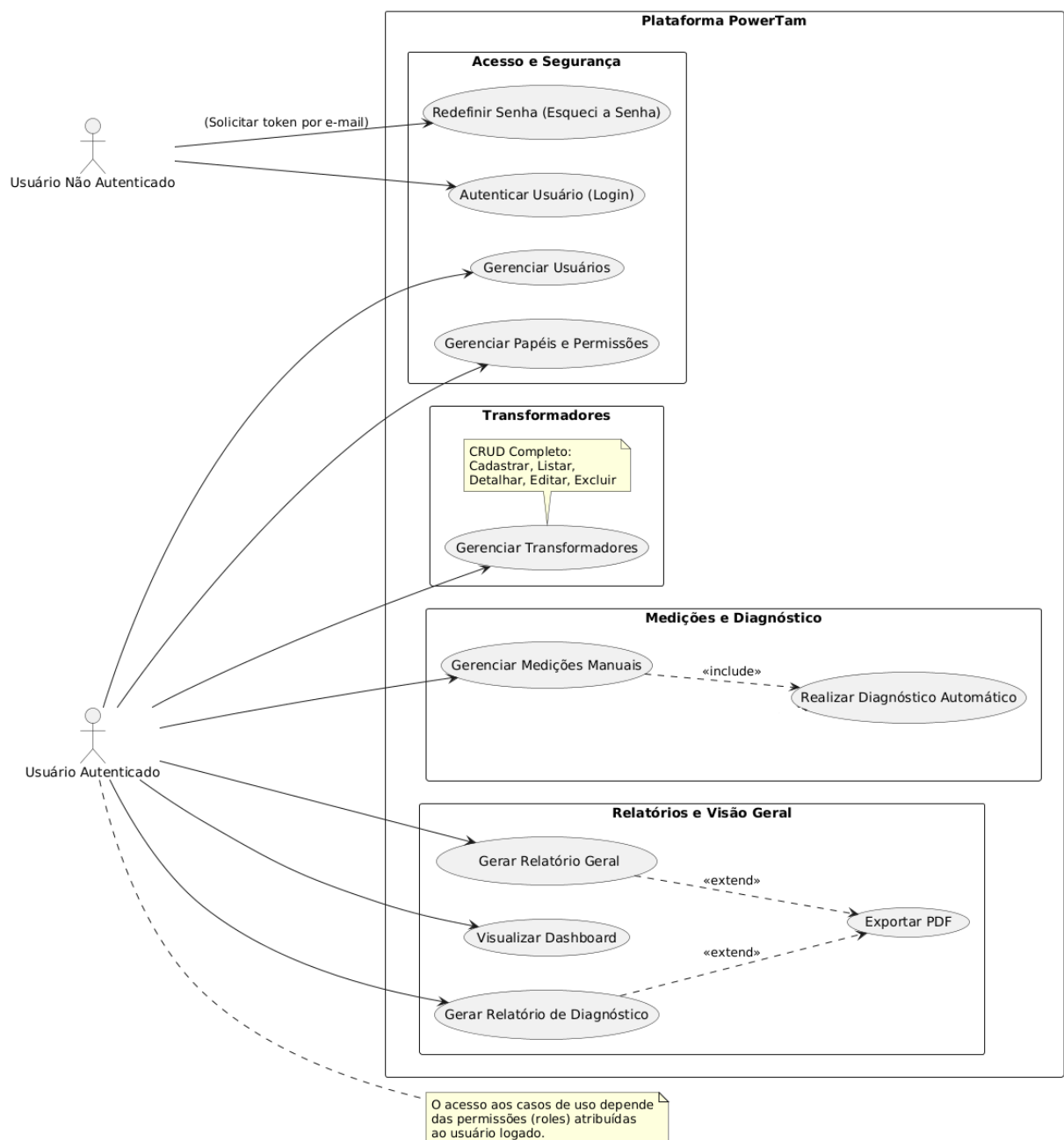
Objetivo:	Faz o cadastro de um novo transformador no sistema.
Requisitos:	RF01
Atores:	Usuário
Pré-condição:	Usuário está autenticado e tem a permissão CADASTRAR TRANSFORMADOR.
Gatilho:	O Usuário clica no botão ADICIONAR TRANSFORMADOR na tela de gerenciamento de transformadores.
Fluxo Principal:	1. O sistema apresenta o formulário de cadastro de transformador na tela. 2. O Usuário informa os dados do novo transformador (identificador, modelo, potência, local de instalação, etc.). 3. O sistema valida os dados informados. [A1] 4. O sistema registra o novo transformador na base de dados. 5. O sistema informa ao Usuário que a operação foi realizada com sucesso. 6. O sistema recarrega a lista de transformadores.
Pós-condição:	Um novo transformador é adicionado à base de dados.
Fluxos Alternativos:	• [A1] - Dados Inválidos 1. O sistema informa ao Usuário quais dados estão inválidos. 2. Volta para o passo 2.

Diagrama de casos de uso

Para o diagrama de casos de uso, optou-se por representar um ator genérico denominado Usuário Autenticado. Como o sistema implementa um Controle de Acesso Baseado em

Papéis (RBAC - *Role-Based Access Control*), os privilégios de execução de cada funcionalidade não são vinculados a tipos estáticos de usuários (como “Técnico” ou “Gerente”), mas sim a permissões granulares (ex: `CADASTRAR_TRANSFORMADOR`) atribuídas dinamicamente a papéis armazenados no banco de dados. Portanto, no diagrama a seguir, o ator representa qualquer usuário que possua a credencial de acesso necessária para aquele caso de uso específico.

Figura 4.1: Diagrama de Casos de Uso do Sistema



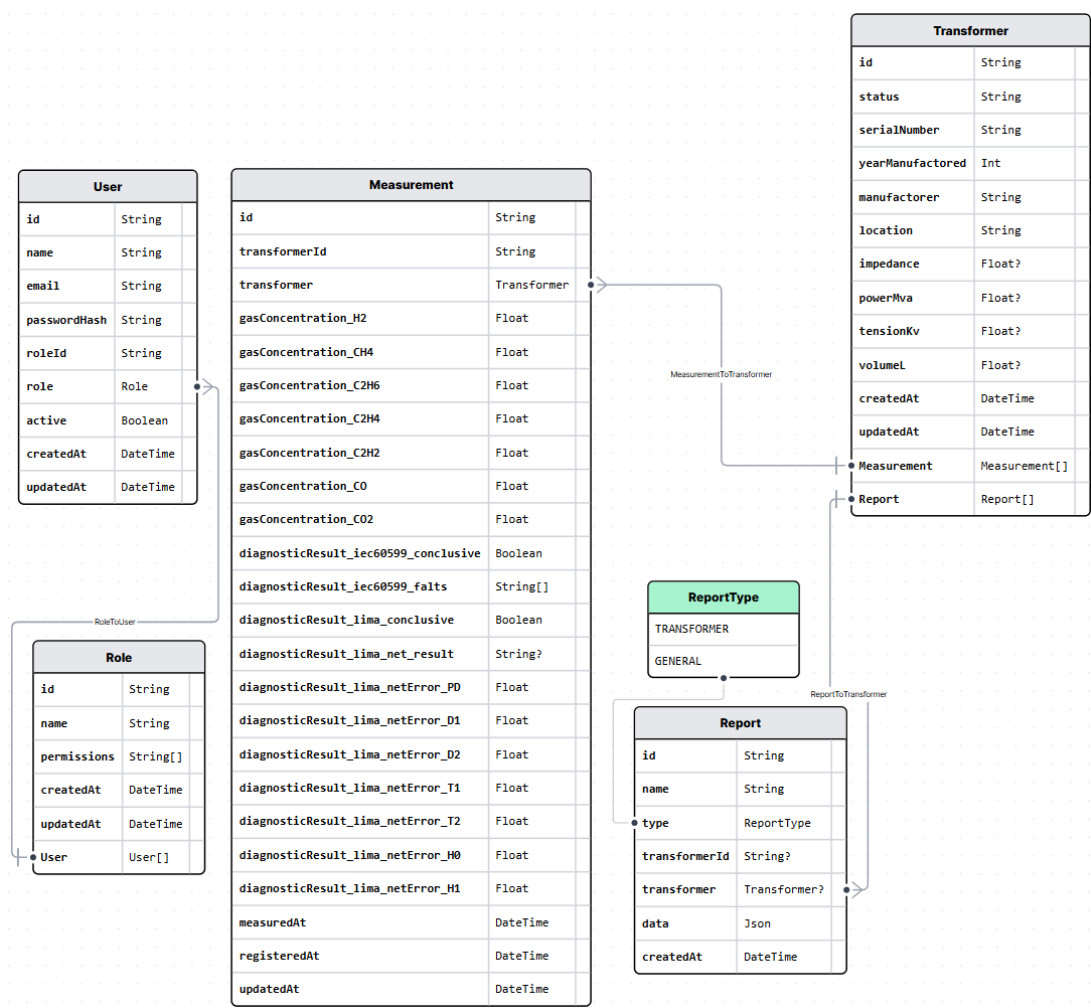
Fonte: O Autor (2026).

4.3.1 Entidades e Relacionamentos

A estrutura de banco de dados foi modelada para representar o isolamento dos contextos delimitados da aplicação. No módulo de identidade, a tabela `User` possui uma chave estrangeira para a tabela `Role`, onde o campo `permissions` armazena um *array* de strings (ex: formato JSON) contendo as permissões granulares do sistema.

No módulo de diagnósticos, destaca-se o relacionamento um-para-muitos entre `Transformer` e `Measurement`. É importante notar que a tabela de medições (`Measurement`) não armazena apenas os valores brutos dos gases, mas também persiste o resultado processado pelos algoritmos (campos com prefixo `diagnosticResult_iec60599` e `diagnosticResult_lima`). Essa decisão de projeto otimiza a performance do *Dashboard* e Relatórios, evitando que o diagnóstico precise ser recalculado a cada visualização de histórico.

Figura 4.2: Diagrama Entidade-Relacionamento - Banco de Dados



Fonte: O Autor (2026).

4.4 Teste de Usabilidade

Para validar a interface e a experiência do usuário na plataforma PowerTam, foi realizado um teste de usabilidade. O objetivo foi avaliar se o sistema é fácil de usar e se cumpre o papel de ser uma ferramenta intuitiva para o público-alvo. A seguir, são apresentados o planejamento, o perfil dos participantes e o roteiro de tarefas executadas.

4.4.1 Planejamento e Protocolo de Execução

Inicialmente, os usuários preencheram um formulário via *Google Forms* com seu *e-mail* para contato e o termo de aceite. Ao concordar, os participantes autorizaram a gravação da sessão (áudio e vídeo) e o uso da câmera e do microfone. Também ficou alinhado que, ao final do teste, responderiam a um questionário de usabilidade com as 10 perguntas do método SUS e mais 3 questões subjetivas descritas abaixo:

1. O que você achou mais fácil ou positivo na plataforma? (Obrigatória)
2. Qual parte ou funcionalidade você achou mais confusa ou difícil de interagir? (Obrigatória)
3. Espaço para sugestões de melhorias ou comentários gerais. (Opcional)

Tanto o formulário de inscrição quanto o questionário de usabilidade pós-teste estão disponíveis para consulta no Apêndice A.24 e no Apêndice A.24, respectivamente.

Os testes foram feitos de forma totalmente remota e individual, utilizando a plataforma *Google Meet* para a videoconferência e gravação de cada sessão.

Antes de iniciar, foi feita uma breve apresentação de 5 minutos explicando o objetivo do PowerTam, sem mostrar telas e sem ensinar o usuário a utilizar o sistema, justamente para avaliar se a interface é intuitiva e como seria o andamento do teste. Depois disso, foi enviado ao participante um arquivo PDF contendo o roteiro de tarefas (Apêndice A.24) com as instruções e os dados necessários. O usuário terá que ler as orientações e executar as ações sozinho, sem fazer perguntas ao aplicador, sinalizando apenas quando terminar cada etapa.

4.4.2 Perfil dos Participantes

Os participantes do teste foram engenheiros eletricitas. A escolha desse público é ideal porque eles possuem o conhecimento técnico sobre transformadores de potência e suas possíveis falhas.

Isso permite avaliar se a Linguagem Ubíqua adotada no sistema (os termos técnicos, siglas e variáveis de engenharia usados nas telas) faz sentido na prática para quem realmente vai operar o *software* no dia a dia.

4.4.3 Roteiro de Tarefas Propostas

O roteiro de testes definido possui sete tarefas sequenciais que cobrem desde o uso técnico do sistema até a parte de administração e controle de acesso:

- **Tarefa 1 (Autenticação e Reconhecimento):** Efetuar o *login* no sistema com as credenciais fornecidas e interpretar as métricas iniciais apresentadas no *Dashboard*.
- **Tarefa 2 (Gestão de Ativos):** Realizar o cadastro de um novo transformador de potência preenchendo os campos obrigatórios de identificação técnica.
- **Tarefa 3.1 (Operação e Diagnóstico 1):** Inserir manualmente uma nova análise cromatográfica de gases dissolvidos e avaliar o duplo diagnóstico gerado automaticamente na tela (norma IEC 60599 e Método de Lima).
- **Tarefa 3.2 (Operação e Diagnóstico 2):** Semelhante à tarefa anterior, porém com dados diferentes.
- **Tarefa 4 (Encerramento do Fluxo):** Solicitar a geração do relatório técnico individualizado do ativo e realizar a exportação do documento em formato PDF.
- **Tarefa 5 (Cadastrar um Papel):** Cadastrar um papel de usuário chamado “Estagiário” apenas com as permissões de “Visualizar Relatórios” e “Ver o *Dashboard*”.
- **Tarefa 6 (Cadastrar um Usuário):** Cadastrar um novo usuário no sistema e atribuir a ele o papel “Estagiário” criado na tarefa anterior.

5 IMPLEMENTAÇÃO DA PLATAFORMA

Este capítulo detalha o processo de desenvolvimento e as decisões técnicas tomadas para a concretização da plataforma PowerTam. Implementou-se o sistema segundo a arquitetura planejada.

A seguir, são apresentadas as etapas de implementação e trechos de código mais relevantes que compõem o núcleo de diagnóstico do sistema, evidenciando como a lógica de negócio foi isolada na camada de Domínio, conforme preconizado pelo *Domain-Driven Design* (DDD).

5.1 Implementação do Núcleo de Diagnóstico

O coração da plataforma reside no módulo `transformer-diagnosis`, responsável por processar as concentrações de gases e determinar a condição operativa do equipamento. A implementação foi dividida em dois serviços principais, correspondendo aos métodos de IEC 60599 e LIMA (2013).

5.1.1 Algoritmo Baseado em Redes Neurais (LIMA)

A implementação do método de Lima exigiu a reconstrução da arquitetura de Redes Neurais Artificiais (RNA) autoassociativas. Diferente de abordagens tradicionais que utilizam bibliotecas de alto nível como TensorFlow ou PyTorch, optou-se por implementar o *forward pass* (propagação direta) da rede manualmente utilizando a biblioteca matemática `mathjs` para as operações de matrizes.

O código a seguir (Listagem 5.1) demonstra o método `classify` da classe `LimaNeuralNetFaultClassifier`. O algoritmo itera sobre um conjunto de redes pré-treinadas (carregadas no objeto `limaNetData`), calcula a saída da rede para as razões de gases de entrada e determina o erro quadrático médio entre a entrada e a saída reconstruída.

```

1 // Trecho de: neural-net-lima-fault-classifier/index.ts
2
3 export default class LimaNeuralNetFaultClassifier extends LimaFaultClassifier {
4   async classify(gasConcentration: GasConcentration): Promise<LimaDiagnosticResult> {
5     // 1. Calculo das razoes gasosas (Input da Rede)
6     const gasRatios = this.getRatios(gasConcentration);
7
8     // Matriz de entrada X (3x1)
9     const x = matrix([
10       [gasRatios.C2H2_C2H4],
11       [gasRatios.CH4_H2],
12       [gasRatios.C2H4_C2H6],
13     ]);
14
15     // 2. Iteracao sobre as redes especialistas (PD, D1, D2, T1, T2...)
16     for (const _key in limaNetData) {
17       const network = limaNetData[key];
18
19       // Pesos e Vieses carregados do treinamento
20       const W1 = matrix(network.input.weights);
21       const b1 = matrix(network.input.bias);
22       const W2 = transpose(matrix(network.output.weights));
23       const b2 = matrix(network.output.bias);
24
25       // 3. Forward Pass: Camada Oculta com ativacao Sigmoide
26       const h = add(multiply(W1, x), b1).map(sigmoid);
27
28       // 4. Forward Pass: Camada de Saida (Reconstrucao)
29       const x_hat = add(multiply(W2, h), b2);
30
31       // 5. Calculo do Erro de Reconstrucao
32       const E = subtract(x, x_hat);
33       const error = multiply(transpose(E), E).get([0, 0]) / 3;
34
35       netError[key] = error; // Armazena o erro para esta falha
36     }
37
38     return new LimaDiagnosticResult({ conclusive: true, netError });
39   }
40 }

```

Listing 5.1: Cálculo do erro de reconstrução na RNA de Lima

A implementação destaca-se pelo uso de operações vetoriais (*multiply*, *transpose*, *add*) que otimizam o processamento, pois, segundo os conceitos da álgebra linear, operações em vetores e matrizes são mais eficientes do que a utilização de múltiplos *loops* iterativos (*for loops*) aninhados (ANTON; RORRES, 2012). Além disso, o código torna-se mais legível e de melhor interpretação.

5.1.2 Algoritmo Baseado em Regras (IEC 60599)

Em contraste com a complexidade das redes neurais, a implementação da norma IEC 60599 baseia-se em uma árvore de decisão determinística. O desafio técnico aqui foi traduzir fielmente a tabela de códigos de gases da norma para estruturas condicionais legíveis e manuteníveis.

A classe `IEC50599FaultClassifier` (Listagem 5.2) encapsula essa lógica. O método primeiro converte as concentrações absolutas em razões adimensionais e, em seguida, verifica em qual região do espaço de falhas a amostra se encontra.

```

1 // Trecho de: domain/services/iec60599-fault-classifier.ts
2
3 private classifyFault(ratios: GasRatios): Set<IEC60599DiagnosticResult.Fault> {
4     const { C2H2_C2H4, CH4_H2, C2H4_C2H6 } = ratios;
5     const faults = new Set<IEC60599DiagnosticResult.Fault>();
6
7     // Descargas Parciais (PD)
8     if (CH4_H2 < 0.1 && C2H4_C2H6 < 0.2) {
9         faults.add(IEC60599DiagnosticResult.Fault.PD);
10    }
11
12    // Descargas de Alta Energia (D2)
13    if (
14        C2H2_C2H4 > 0.6 && C2H2_C2H4 < 2.5 &&
15        CH4_H2 > 0.1 && CH4_H2 < 1 &&
16        C2H4_C2H6 > 1
17    ) {
18        faults.add(IEC60599DiagnosticResult.Fault.D2);
19    }
20
21    // Falha Termica de Alta Temperatura (T3)
22    if (C2H2_C2H4 < 0.2 && CH4_H2 > 1 && C2H4_C2H6 > 4) {
23        faults.add(IEC60599DiagnosticResult.Fault.T3);
24    }
25
26    // ... (outras condicoes omitidas para brevidade)
27
28    return faults;
29 }

```

Listing 5.2: Classificação de falhas segundo a norma IEC 60599

O uso da estrutura de dados `Set` (Conjunto) permite que o sistema identifique múltiplas falhas simultâneas caso os critérios se sobreponham, aumentando a robustez do diagnóstico em casos de fronteira.

5.2 Implementação da API e Persistência

Para suportar os algoritmos de diagnóstico apresentados, foi desenvolvida uma infraestrutura de *backend* robusta utilizando Node.js. A arquitetura de dados e a comunicação via API foram projetadas para garantir integridade, segurança de tipos (*type-safety*) e validação rigorosa das entradas.

5.2.1 Modelagem e Persistência de Dados (Prisma ORM)

A camada de persistência foi implementada utilizando o *Prisma ORM*. A escolha desta ferramenta permitiu definir o esquema do banco de dados de forma declarativa, facilitando a visualização dos relacionamentos e gerando automaticamente as migrações para o banco PostgreSQL.

A Listagem 5.3 apresenta a modelagem das duas principais entidades do domínio: o Transformador e a Medição. Destaca-se o relacionamento um-para-muitos (1:N), onde um transformador pode possuir múltiplas medições associadas, formando seu histórico clínico.

```
1 // Arquivo: prisma/schema.prisma
2
3 model Transformer {
4   id          String    @id
5   serialNumber String    @unique
6   manufacturer String
7   powerMva    Float?
8   tensionKv   Float?
9
10  // Relacionamento reverso: Um transformador tem varias medicoes
11  Measurement Measurement[]
12
13  createdAt    DateTime
14  updatedAt    DateTime
15 }
16
17 model Measurement {
18   id          String    @id
19   transformerId String
20  // Chave estrangeira ligando a medicao ao transformador
```

```

21  transformer      Transformer @relation(fields: [transformerId],
    references: [id])
22
23  // Dados brutos da analise cromatografica (ppm)
24  gasConcentration_H2      Float
25  gasConcentration_CH4     Float
26  gasConcentration_C2H6    Float
27  gasConcentration_C2H4    Float
28  gasConcentration_C2H2    Float
29  // ... outros gases omitidos
30
31  // Persistencia dos resultados dos diagnosticos
32  diagnosticResult_iec60599_falts String[]
33  diagnosticResult_lima_net_result String?
34
35  measuredAt      DateTime // Data da coleta do oleo
36  registeredAt    DateTime // Data do registro no sistema
37 }

```

Listing 5.3: Definição do Esquema de Dados no Prisma

5.2.2 Validação e Contratos de API (Zod)

Para garantir que o sistema processe apenas dados válidos, utilizou-se a biblioteca *Zod* para a definição de esquemas de validação. Essa abordagem permite declarar as regras de negócio para os dados de entrada (como tipos de dados e formatos obrigatórios) diretamente na camada de Aplicação.

A Listagem 5.4 ilustra o Caso de Uso de registro de medição. O esquema *ParamsSchema* define rigorosamente o contrato esperado pela API, garantindo que a data esteja no formato ISO 8601 e que o objeto de concentração de gases respeite a estrutura definida pelo Objeto de Valor *GasConcentration*.

```

1  // Arquivo: application/use-cases/measurements/register-measurement.ts
2
3  class RegisterMeasurementUseCase extends UseCase<Params, Result> {
4    // ... construtor e metodos
5
6    async execute({ transformerId, data }: Params): Promise<Result> {
7      // 1. Verificacao de permissao (RBAC)

```

```
8     this.authorizationService.checkCanRegisterMeasurement();
9
10    // 2. Busca do transformador no repositório
11    const transformer = await this.transformerRepository.findById(
12      transformerId);
13    if (!transformer) {
14      throw new TransformerNotFoundError(transformerId);
15    }
16
17    // 3. Criação do Objeto de Valor (aplica regras de domínio aos gases)
18
19    const gasConcentration = new GasConcentration(data.gasConcentration)
20    ;
21
22    // 4. Persistência via serviço de domínio
23    const measurement = await this.measurementService.
24      registerMeasurement({
25        transformer,
26        gasConcentration,
27        measuredAt: new Date(data.measuredAt),
28      });
29
30    return { id: measurement.id };
31  }
32}
33
34// Definição do Contrato de Entrada (Schema Zod)
35namespace RegisterMeasurementUseCase {
36  export const ParamsSchema = z.object({
37    transformerId: z.string(), // Deve ser uma string válida
38    data: z.object({
39      gasConcentration: GasConcentration.ValueSchema, // Schema
40      reutilizavel
41      measuredAt: z.string().datetime(), // Validação de formato de data
42    }),
43  });
44  // ...
45}
```

Listing 5.4: Exemplo do uso de um contrato Zod em um Caso de Uso.

A integração desse contrato Zod com a rota da API (Listagem 5.5) é feita de forma automática. O *middleware* da aplicação intercepta a requisição HTTP, valida o corpo da mensagem (JSON) verificando se os dados respeitam o contrato `ParamsSchema` e, em caso de erro, retorna automaticamente uma resposta HTTP 400 (*Bad Request* - Requisição Inválida) com os detalhes da violação, impedindo que dados inconsistentes cheguem ao núcleo do sistema.

```
1 // Arquivo: presentation/.../post.register-measurement.ts
2
3 const postRegisterMeasurement = privateEndpointsFactory.build({
4   method: "post",
5   tag: RouteTag.DIAGNOSIS_MEASUREMENTS,
6   description: "Registers a new measurement for transformer diagnosis.",
7   input: RegisterMeasurementUseCase.ParamsSchema, // Vinculo com o
8           Contrato Zod definido no caso de uso
9   output: RegisterMeasurementUseCase.ResultSchema,
10  handler: async ({ input, options: { authUser } }) => {
11    try {
12      // O 'input' aqui ja esta validado e tipado
13      const result = await container
14        .registerMeasurementUseCase(authUser)
15        .execute(input);
16      return result;
17    } catch (error) {
18      throw errorToHttpError(error);
19    }
20  },
21 });
```

Listing 5.5: Rota da API com validação automática

5.3 Implementação da Interface (Frontend)

A interface da plataforma PowerTam foi desenvolvida como uma *Single Page Application* (SPA) utilizando a biblioteca React. Esta seção detalha as escolhas estruturais do *frontend*, abordando a organização dos componentes da interface, o gerenciamento de estado e o consumo dos *endpoints* disponibilizados pela API REST.

5.3.1 Visualização de Dados e Controle de Acesso

O Painel de Controle (*Dashboard*) atua como a página inicial para os gestores, consolidando métricas vitais da frota de transformadores. A implementação desta tela (Listagem 5.6) demonstra a integração de componentes de visualização gráfica e o controle de acesso granular.

O componente `PermissionGuard` envolve o conteúdo sensível da página. Ele verifica em tempo de execução se o usuário autenticado possui a permissão `VIEW_DASHBOARD` (Visualizar *Dashboard*). Caso contrário, um componente de *fallback* genérico é exibido, garantindo a segurança da informação na camada de apresentação.

```
1 // Arquivo: features/dashboard/pages/dashboard-page/index.tsx
2
3 const DashboardPage: FC = () => {
4   return (
5     <PageContainer>
6       <PageTitle>Dashboard</PageTitle>
7
8       {/* Controle de Acesso: So renderiza se tiver permissao */}
9       <PermissionGuard
10         permissionCode={Permission.VIEW_DASHBOARD}
11         fallback=<FallbackComponent />
12       >
13         <InnerComponent />
14       </PermissionGuard>
15     </PageContainer>
16   );
17 };
18
19 const InnerComponent: FC = () => {
20   // Hook personalizado para buscar dados da API
21   const { dashboardData, isLoading } = useDashboardData();
22
23   return (
24     <LoadingDiv isLoading={isLoading}>
25       <div className="max">
26         {/* Componentes de Visualizacao Grafica */}
27         <StatsCards data={dashboardData} />
28
```

```

29     <section className="grid large-space">
30         <MeasurementsByYearChart
31             data={dashboardData.measurementsCountByYear}
32         />
33         <StatusByTransformerChart
34             inService={dashboardData.transformerCountByStatus.IN_SERVICE
35             ?? 0}
36             outOfService={dashboardData.transformerCountByStatus.
37             OUT_OF_SERVICE ?? 0}
38         />
39     </section>
40 </div>
41 </LoadingDiv>
42 );
43 };

```

Listing 5.6: Estrutura da página de Dashboard com proteção de rota (verificação de autorização)

Para a renderização dos gráficos, utilizou-se a biblioteca `react-charts`, que permite a criação de visualizações responsivas baseadas em vetores (SVG), garantindo nitidez em qualquer resolução de tela.

5.3.2 Exportação e Manipulação de Relatórios (PDF)

Uma das funcionalidades do sistema é a exportação dos laudos técnicos. Diferente de abordagens simples que geram o PDF no navegador (o que seria limitado e pesado), a arquitetura do PowerTam delega essa tarefa ao *backend*, que retorna o documento como um fluxo de dados binários (*Blob*).

O desafio técnico no *frontend* foi gerenciar o recebimento desse binário e apresentá-lo ao usuário sem recarregar a página. A Listagem 5.7 apresenta o *hook* personalizado `useRenderReport`, responsável por encapsular essa lógica.

```

1 // Arquivo: features/reports/render/hooks/use-render-report.ts
2
3 export const useRenderReport = (reportId: string) => {
4     const render = useCallback(async () => {
5         setIsLoading(true);
6         try {

```

```
7      // 1. Chamada a API solicitando o Blob (Stream de bytes)
8      const blob = await renderReportService.render(reportId);
9
10     // 2. Criação de uma URL temporária no navegador apontando para o
    Blob
11     const fileURL = URL.createObjectURL(blob);
12
13     // 3. Abertura do PDF em nova aba nativa do navegador
14     window.open(fileURL, "_blank", "noopener,noreferrer");
15
16     // 4. Limpeza de memória após o uso
17     setTimeout(() => {
18         URL.revokeObjectURL(fileURL);
19     }, 30000);
20
21     } catch (error) {
22         toast.error(errorToText(error));
23     } finally {
24         setIsLoading(false);
25     }
26 }, [reportId]);
27
28 return { isLoading, render };
29 };
```

Listing 5.7: Manipulação de Blob para visualização de PDF

Essa abordagem proporciona uma experiência de usuário superior, pois utiliza o visualizador de PDF nativo do navegador (Chrome/Firefox), mantendo a aplicação web leve e responsiva.

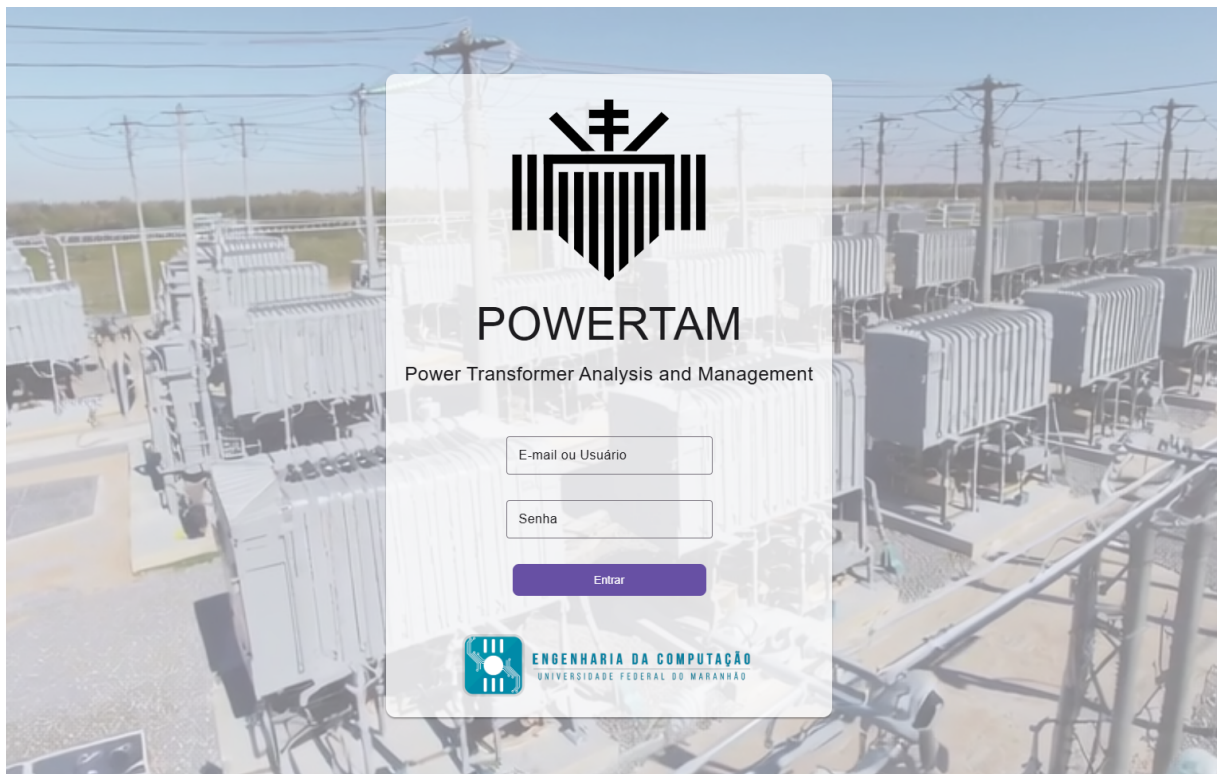
6 RESULTADOS

Este capítulo apresenta a validação funcional e operacional da plataforma PowerTam. O objetivo é demonstrar que os requisitos definidos na etapa de modelagem foram plenamente atendidos e que os algoritmos de diagnóstico implementados são capazes de identificar corretamente as falhas incipientes com base em amostras reais ou simuladas de gases dissolvidos. Inicialmente são mostradas algumas capturas de telas da aplicação, em seguida alguns cenários de teste para validação funcional, e por fim o resultado da avaliação SUS feita pelos usuários de teste.

6.1 Telas da Aplicação

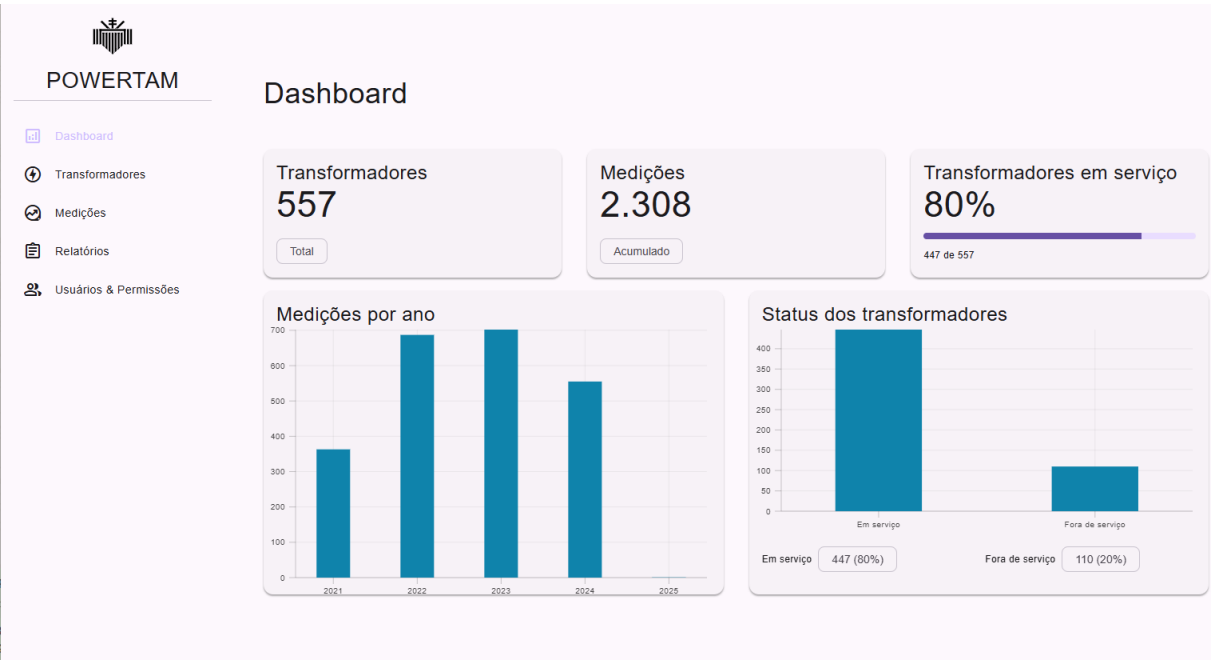
Abaixo algumas das principais telas da aplicação.

Figura 6.1: Tela de *Login*



O Autor (2026).

Figura 6.2: Tela de *Dashboard*



O Autor (2026).

Figura 6.3: Tela de Listagem e Filtro de Transformadores

The Transformadores list page includes a search bar, a table of transformer data, and a '+ Registrar' button. The table has the following columns: Local, Série, Fabricante, Status, and Potência.

Local	Série	Fabricante	Status	Potência
SE BRAGANÇA	KA0156A002	TRAFO (1990)	Em Operação	
SE MARITUBA	5423334	WEG (2009)	Em Operação	
SE MARAPANIM	247078	WEG (2006)	Em Operação	
MA-TI-SE-COO-TRM-TRAF-02T1-0	A15110C	TOSHIBA (2015)	Em Operação	
MA-IZ-SE-BPT-TRM-TRAF-02T1-0	A10012	TOSHIBA (2011)	Em Operação	
SE MARABÁ	A-99031	TOSHIBA (2000)	Em Operação	
SE RUROPOLIS	223521	WEG (2005)	Em Operação	
MA-SL-SE-RNC-TRM-TRAF-02T1-0	A97046	TOSHIBA (1998)	Em Operação	
MA-SL-SE-CRP-TRM-TRAF-09T2-0	50 325	WEG (2016)	Em Operação	
MA-SL-SE-RSO-TRM-TRAF-02T1-0	KA3013A001	TRAFO (2007)	Em Operação	

O Autor (2026).

Figura 6.4: Tela de Registro de Transformadores

Registrar Transformador

Número de Série

Local

Status

Em OperaçãoFora de Operação

Fabricação

Fabricante

Ano

Propriedades

Potência (MVA)Tensão (Kv)

Volume (L)Impedância (Ω)

O Autor (2026).

Figura 6.5: Tela de Detalhes de Transformador

POWER TAM

Dashboard

Transformadores

Medições

Relatórios

Usuários & Permissões

← Transformador - SE BRAGANÇA - KA0156A002

Status:

Em Operação

Informações Técnicas

LocalSE BRAGANÇA

SérieKA0156A002

FabricanteTRAFO

Ano de Fabricação1990

Potência

Tensão

Volume

Impedância

Último Diagnóstico

IEE 60599

Não Conclusivo

LIMA

T1

Medições

Relatórios

Diagnósticos Recentes

#

Data

Diagnóstico IEC 60599

Diagnóstico LIMA

14

04/08/2024

Não Conclusivo

T1

13

27/03/2023

Não Conclusivo

T1

Shioeaki

Sair

O Autor (2026).

Figura 6.6: Tela de Listagem e Filtro de Medições


POWERTAM

Dashboard

Transformadores

Medições

Relatórios

Usuários & Permissões

Medições

Filtro

11

10 por página < página 1 de 13 >

Local	Série	Data	Diagnóstico IEC 60599	Diagnóstico Lima
SE PEDREIRA	KA2062A001	10/08/2024	PD	D1
SE BUJARU	10862101	23/07/2024	T2	T2
MA-SL-SE-PHO-TRM-TRAF-02T1-0	C1-3/78-2	27/06/2024	T3	T2
MA-SL-SE-MAR-TRM-TRAF-02T1-0	66222	26/01/2024	T3	T2
SE MARCO	35824	08/01/2024	T1	T1
SE MARCO	35824	05/01/2024	T1	T1
SE BAGRE	10106796681	18/12/2023	T3	T2
MA-IZ-SE-PFD-TRM-TRAF-02T1-0	906188	24/11/2023	T2	T2
SE NOVO PROGRESSO	164775	10/04/2023	T3	T2
SE PEDREIRA	KA2062A001	03/02/2023	T1	T1

O Autor (2026).

6.2 Validação Funcional: Estudos de Caso

Para validar a precisão do núcleo de diagnóstico, foram elaborados cenários de teste simulando diferentes condições operativas de um transformador de potência. Os dados de entrada (concentração de gases em ppm) foram submetidos à plataforma e os resultados foram comparados com a literatura técnica.

6.2.1 Cenário 1: Operação Normal

Neste primeiro cenário, inseriu-se no sistema uma amostra de óleo simulando um transformador saudável, onde a concentração de gases combustíveis é baixa e gerada apenas pelo envelhecimento natural do isolamento.

• Dados de Entrada (ppm):

- $H_2 = 64.64$
- $CH_4 = 12.33$
- $C_2H_6 = 300.86$

- $C_2H_4 = 3.51$
- $C_2H_2 = 9.58$

- **Resultado Esperado:** Condição Normal.

A Figura 6.7 ilustra a tela de detalhamento da medição após o processamento.

Figura 6.7: Diagnóstico do sistema para o Cenário 1 (Operação Normal)



O Autor (2026).

Como observado, tanto o método de IEC 60599 quanto as redes neurais de Lima (2013) convergiram para o diagnóstico de normalidade.

6.2.2 Cenário 2: Detecção de Falha Térmica (T2/T3)

O segundo cenário teve como objetivo testar a sensibilidade do algoritmo a um superaquecimento severo no óleo. Conforme a fundamentação teórica, falhas térmicas elevam drasticamente a produção de Etileno (C_2H_4) e Metano (CH_4).

- **Dados de Entrada (ppm):**

- $H_2 = 5446$
- $CH_4 = 7807$
- $C_2H_6 = 1728$
- $C_2H_4 = 7277$
- $C_2H_2 = 11$

- **Resultado Esperado:** Falha Térmica > 700°C.

Figura 6.8: Diagnóstico de Falha Térmica gerado pela plataforma



Autor (2025).

A plataforma classificou a amostra corretamente. No método IEC 60599, as razões calculadas direcionaram a árvore de decisão para a falha térmica **T3**. Simultaneamente, o algoritmo de Lima identificou a assinatura vetorial correspondente a falha **T2** (que engloba a falha T2 e T3 da IEC 60599), atestando a funcionalidade do motor de inferência duplo.

6.2.3 Cenário 3: Detecção de Descarga Parcial (PD) em Zona Não Conclusivas da IEC 60599

O terceiro cenário visou testar a robustez do diagnóstico em falhas de Descarga Parcial (PD) sob condições em que as razões de gases operam fora dos limites estritos definidos pela norma IEC 60599. Conforme a fundamentação teórica, a Descarga Parcial é caracterizada pela ionização localizada do óleo, resultando em uma produção predominante de Hidrogênio (H_2) e traços de Metano (CH_4).

- **Dados de Entrada (ppm):**
 - $H_2 = 97.55$
 - $CH_4 = 8.69$
 - $C_2H_6 = 112.66$
 - $C_2H_4 = 3.08$
 - $C_2H_2 = 0$
- **Resultado Esperado:** Descarga Parcial (PD).

Figura 6.9: Diagnóstico de Descarga Parcial gerado pela plataforma



Este teste focou na capacidade de complementação entre os modelos implementados: enquanto a lógica de razões da IEC 60599 retornou um resultado “Não Conclusivo”, o Método de Lima foi capaz de identificar a assinatura da falha através do reconhecimento de padrões, garantindo que o ativo tenha o diagnóstico mesmo em situações de medições limítrofes.

6.3 Geração de Relatórios Técnicos

O requisito de emissão de laudos em PDF foi validado com sucesso. O sistema utiliza os modelos HTML desenvolvidos para gerar tanto o relatório geral quanto o individual por transformador.

Nas Figuras 6.10 e 6.11 podem ser vistas as prévias desses documentos: o relatório **geral** foca na visão macro da frota de ativos, enquanto o de **transformador** detalha o histórico cromatográfico e os diagnósticos gerados pelo sistema.

Figura 6.10: Relatório de transformador exportado em formato PDF

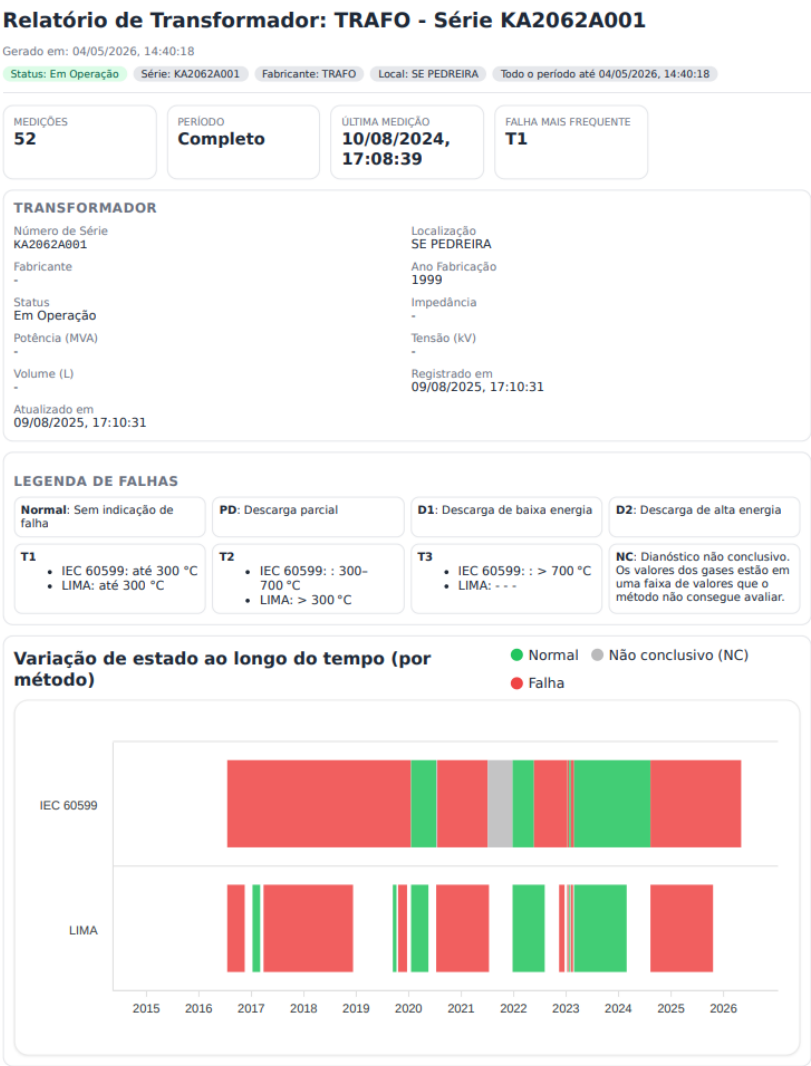


Figura 6.11: Relatório de geral exportado em formato PDF



Fonte: O Autor (2026)

6.4 Avaliação de Usabilidade (SUS)

O protocolo de testes foi executado com 7 engenheiros eletricitas voluntários, que logo ao fim das sessões remotas responderam ao questionário SUS.

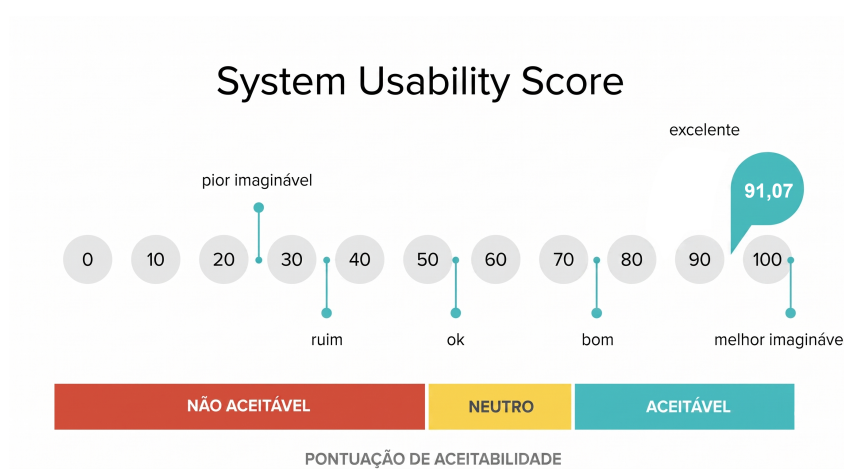
A Tabela 6.1 apresenta a pontuação final obtida por cada um dos participantes (anonimizados de P1 a P7 para preservar a privacidade dos voluntários).

A média final obtida pela plataforma PowerTam foi de **91,07 pontos**. Com essa pontuação a plataforma se classifica como **“Excelente”** na escala SUS. Esse indicador valida estatisticamente que a interface desenvolvida cumpre os critérios ergonômicos de facilidade de aprendizado e satisfação subjetiva do usuário final.

Tabela 6.1: Pontuações individuais obtidas no questionário SUS

Participante	Nota SUS
P1	100,0
P2	90,0
P3	77,5
P4	90,0
P5	85,0
P6	95,0
P7	100,0
Média Final	91,07

Figura 6.12: Nota da plataforma PowerTam na escala SUS.



O Autor (2026).

6.4.1 Análise dos *Feedbacks* Subjetivos (Perguntas Abertas)

Abaixo estão os resultados coletados e análises feitas, divididos por pergunta.

Pergunta 1: O que você achou mais fácil ou positivo na plataforma?

Nesta pergunta, os usuários elogiaram bastante a simplicidade e o visual do sistema. Os principais pontos destacados foram:

- Interface intuitiva, organizada e minimalista, deixando as funções fáceis de achar;
- O menu lateral e o *design* confortável para os olhos;
- A facilidade para cadastrar usuários e registrar os transformadores;
- Os gráficos de evolução ao longo do tempo que aparecem no relatório em PDF.

Alguns participantes comentaram que, após fazer o primeiro preenchimento, o uso do sistema fica ainda mais fácil.

Pergunta 2: Qual parte ou funcionalidade você achou mais confusa ou difícil de interagir?

Principais pontos negativos apontados:

- **Tarefa 3 (Cadastro de Gases):** Foi o ponto mais citado como menos intuitivo, principalmente na hora de registrar a primeira medição;
- **Campo de Data:** Um participante achou ruim ter que selecionar a data pelo calendário visual, sugerindo que seria mais rápido poder digitar diretamente;
- **Tela de Permissões:** A criação de um novo perfil de acesso gerou uma dúvida pontual de interação em um dos testes.

Vale destacar que dois dos sete participantes relataram não ter encontrado nenhuma dificuldade no sistema.

Pergunta 3: Espaço para sugestões de melhorias ou comentários gerais

Houve comentários que elogiaram a utilidade do PowerTam para automatizar o processo de diagnóstico. As principais sugestões deixadas pelos usuários para melhorar o *software* foram:

- **Formulários Técnicos:** Deixar todos os campos de entrada de gases alinhados na vertical e incluir o símbolo de porcentagem (%) no campo de impedância do transformador;
- **Gerenciamento de Usuários:** Permitir o cadastro de uma senha inicial diretamente na criação do usuário e colocar um botão para exigir a mudança de senha no primeiro acesso;
- **Tela de Relatórios:** Adicionar um campo de busca por texto para filtrar a lista de ativos (caso a frota seja muito grande) e colocar títulos claros no cabeçalho da tabela (como Nome, Tipo, Gerado em e Ações).

7 CONCLUSÃO

O desenvolvimento deste trabalho consistiu no projeto e na implementação da plataforma *web* PowerTam, estruturada para auxiliar engenheiros e técnicos no monitoramento e diagnóstico de falhas em transformadores de potência. Diante da criticidade desses ativos para o Sistema Elétrico de Potência (SEP), a automatização da Análise de Gases Dissolvidos (AGD) demonstrou-se viável para subsidiar a execução de estratégias de manutenção preditiva.

7.1 Considerações Finais

O sistema atendeu ao objetivo de centralizar as informações históricas dos equipamentos e automatizar os diagnósticos cromatográficos. O motor de inferência híbrido implementado integrou com sucesso os limites normativos estabelecidos pela norma IEC 60599 e a capacidade de classificação das Redes Neurais baseadas no Método de Lima (2013), fornecendo diagnósticos paralelos diretamente na interface de usuário.

A infraestrutura de *backend*, desenvolvida sob os princípios do *Domain-Driven Design* (DDD) e seguindo o modelo *API-First*, estabeleceu uma base adequada para a interoperabilidade de dados. Embora o fluxo atual dependa do cadastro manual das medições, a arquitetura adotada está preparada para receber fluxos contínuos de dados vindos de sensores IoT, o que possibilita a evolução do sistema para um monitoramento em tempo real sem a necessidade de reestruturação do código base.

A validação da interface *web* SPA foi consolidada por meio de testes de usabilidade práticos com sete participantes engenheiros eletricitas. A aplicação do questionário SUS resultou em um *score* médio de 91,07 pontos, classificando a plataforma qualitativamente na categoria “Excelente”. Esse resultado confirma que o fluxo de navegação, a visualização de dados nos *Dashboards* e a emissão de laudos técnicos em PDF são intuitivos para o público-alvo.

Como limitações e desafios para a implantação prática em cenários reais, destaca-se a necessidade de futura integração do sistema com os sistemas de gestão cor-

porativa (ERPs) das concessionárias de energia. Além disso, a transição para sistemas automatizados requer o treinamento operacional dos técnicos de manutenção, garantindo que estejam aptos a interpretar corretamente os diagnósticos e tratar os casos de alertas divergentes ou não conclusivos emitidos pelos algoritmos.

O código fonte da aplicação pode ser acessado na através do endereço: <<https://github.com/rodrigodefrancadev/powertam>>.

7.2 Trabalhos Futuros

Considerando as oportunidades de melhoria mapeadas durante os testes de usabilidade e as tendências de evolução da manutenção 4.0, sugerem-se os seguintes tópicos para trabalhos futuros:

- **Integração IoT em Tempo Real:** Fazer testes com a plataforma para receber dados automaticamente de monitores contínuos de gases instalados diretamente nos transformadores, eliminando a inserção manual.
- **Aplicativo Mobile:** Desenvolver uma versão móvel da interface utilizando *React Native*, permitindo que técnicos de campo insiram medições e consultem históricos diretamente na subestação.
- **Cálculo de Vida Útil Restante:** Incorporar algoritmos preditivos baseados na degradação do papel isolante (análise de furanos) para estimar o tempo de vida útil restante do ativo.
- **Refinamento de UX da aplicação:** Fazer as melhorias na plataforma apontadas no item 6.4.1.
- **Módulo de Notificações Inteligentes:** Aprimorar o serviço de mensagemia (*email-service* atual) para integrar alertas via fsempre que uma nova medição for classificada com *status* crítico de falha iminente.

REFERÊNCIAS

ANTON, H.; RORRES, C. *Álgebra Linear com Aplicações*. 10.0. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. *ABNT NBR ISO 9241-11: Ergonomia da interação homem-sistema — Parte 11: Usabilidade: Definições e conceitos*. Rio de Janeiro, 2018. 31 p.

BAKER, E.; NESE, S. V.; DURSUN, E. Hybrid condition monitoring system for power transformer fault diagnosis. *Energies*, MDPI, v. 16, n. 3, p. 1151, 2023. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/16/3/1151>>.

BANGOR, A.; KORTUM, P. T.; MILLER, J. T. An empirical evaluation of the system usability scale. *International Journal of Human-Computer Interaction*, Taylor & Francis, v. 24, n. 6, p. 574–594, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/10447310802205776>>.

BATISTA, A. F. N. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica), *Diagnóstico de Falhas Incipientes em Transformadores de Potência Baseado na Análise de Gases Dissolvidos no Óleo Isolante Empregando Redes Neurais Artificiais*. Ilha Solteira, SP: [s.n.], 2022. Orientador: Prof. Dr. Fábio Bertequini Leão.

BESSA, A. R. et al. Conventional dissolved gases analysis in power transformers: Review. *Energies*, v. 16, n. 21, p. 1–28, 2023.

BROOKE, J. Sus: A 'quick and dirty' usability scale. In: JORDAN, P. W. et al. (Ed.). *Usability Evaluation in Industry*. London: Taylor & Francis, 1996. p. 189–194.

CONTACT Software. *IoT Platform for Digital Business Models*. 2025. Acesso em: 7 out. 2025. Disponível em: <<https://www.contact-software.com/en/>>.

ELSISI, M. et al. Effective iot-based deep learning platform for online fault diagnosis of power transformers against cyberattacks and data uncertainties. *Measurement*, Elsevier, v. 190, p. 110686, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110686>>.

EVANS, E. *Domain-driven design: tackling complexity in the heart of software*. Boston: Addison-Wesley Professional, 2003. ISBN 978-0321125217.

FIELDING, R. T. *Architectural styles and the design of network-based software architectures*. Tese (Tese de Doutorado) — University of California, Irvine, 2000.

FRONTIN, S. d. O. (Ed.). *Equipamentos de alta tensão: prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas*. Brasília: Teixeira, 2013. 934 p. Projeto de P&D ANEEL – TAESA – BRASNORTE – FINATEC – UnB. ISBN 9788588041097.

Globecore. *[Transformador de potência trifásico]*. 2026. Disponível em: <<https://globecore.com/pt-pt/manutencao-do-transformador/three-phase-transformer/>>. Acesso em: 27 jun. 2026.

- LIMA, S. L. de. *Diagnóstico de Falhas e Tomada de Decisão em Transformadores de Potência*. Tese (Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Maranhão (UFMA), São Luís, MA, 2013. Orientador: Prof. Dr. Osvaldo Ronald Saavedra Mendez.
- MARTIN, R. C. *Clean Architecture: A Craftsman's Guide to Software Structure and Design*. Boston: Prentice Hall, 2017. ISBN 978-0134494166.
- MENDONÇA, R. C. N. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Direito), *A Aplicação do Direito Administrativo Sancionador pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL*. Brasília, DF: [s.n.], 2016. Orientador: Prof. Dr. Mamede Said Maia Filho.
- MIKOWSKI, M. S.; POWELL, J. C. *Single page web applications: JavaScript end-to-end*. [S.l.]: Manning Publications Co., 2013.
- NOGUEIRA, D. d. S.; ALVES, D. P. *Transformadores de potência - teoria e aplicação: tópicos essenciais*. 2009. Projeto apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista. Orientador: Prof. Ivan Herszterg, M.Sc.
- OLIVEIRA, M. M. *Metodologia para avaliação de transformadores de potência através de Health Index e modelo de envelhecimento*. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2021.
- SILVA, M. G. da; GUIMARÃES, L. dos S. Uso do Índice de desenvolvimento humano como instrumento de projeção de demanda de energia elétrica. *Economia e Energia (e&e)*, Rio de Janeiro, n. 86, p. 3–16, 2012.
- UMANS, S. D. *Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley*. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014. Tradução de Anatólio Laschuk. ISBN 9788580553741.
- WANG, G. et al. Power transformer fault diagnosis system based on internet of things. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Springer Nature, v. 2021, n. 21, p. 1–24, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s13638-020-01871-6>>.

APÊNDICE A – DESCRIÇÃO DOS CASOS DE USO

Abaixo segue o detalhamento dos 24 casos de uso do sistema.

A.1 UC01 - Autenticar Usuário

Objetivo:	Autentica uma Pessoa
Requisitos:	RF06
Atores:	Pessoa
Pré-condição:	Usuário não está autenticado
Gatilho:	A Pessoa acessa a página de login do sistema
Fluxo Principal:	1. A Pessoa informa seu usuário e senha e clica em ENTRAR. 2. O sistema identifica o usuário. [A1] 3. O sistema confirma se a senha está correta.[A2] 4. O sistema autentica o usuário. 5. O sistema direciona o usuário para a página de <i>dashboard</i>.
Pós-condição:	Usuário autenticado
Fluxos Alternativos:	• [A1] - Usuário não encontrado 1. Informa ao usuário o erro “Credenciais Inválidas”. 2. Encerra o caso de uso. • [A2] - Senha Incorreta 1. Informa ao usuário o erro “Credenciais Inválidas”. 2. Encerra o caso de uso.

A.2 UC02 - Redefinir Senha

Objetivo:	Redefine a senha de um usuário
Requisitos:	RF07
Atores:	Pessoa
Pré-condição:	Usuário não está autenticado
Gatilho:	A Pessoa acessa a página de login do sistema e clica no botão ESQUECI MINHA SENHA
Fluxo Principal:	1. O sistema redireciona o usuário para a página de redefinição de senha. 2. O usuário informa o e-mail de cadastro e clica em enviar código de verificação. 3. O sistema identifica o usuário.[A1] 4. O sistema envia um e-mail com um link para o usuário prosseguir com a redefinição da senha. 5. O usuário acessa seu e-mail e clica no Link. 6. O sistema valida o Link. [A2] 7. O sistema apresenta um formulário de redefinição da senha. 8. O usuário informa a nova senha, a confirmação da nova senha e clica em Alterar Senha. 9. O sistema valida as informações e faz a alteração da senha do usuário. [A3] 10. O sistema notifica o usuário que a alteração da senha foi bem sucedida. 11. O sistema direciona o usuário para a página de <i>login</i>.
Pós-condição:	Usuário autenticado

Fluxos Alternativos:	• [A1] - Usuário não encontrado 1. Encerra o caso de uso. • [A2] - O link está expirado 1. Informa ao usuário o erro “LINK EXPIRADO” 2. Encerra o caso de uso. • [A3] - Dados inválidos 1. Informa ao usuário o erro (exemplo: senha muito curta, ou senha e verificação não conferem). 2. Volta para o item 8.
-----------------------------	--

A.3 UC03 - Cadastrar Usuário

Objetivo:	Faz o cadastro de usuário no sistema
Requisitos:	RF08
Atores:	Usuário
Pré-condição:	Usuário está autenticado e tem a permissão CADASTRAR USUÁRIO
Gatilho:	O Usuário clica no botão ADICIONAR USUÁRIO na tela de gerenciamento de usuários.
Fluxo Principal:	1. O sistema apresenta o formulário de cadastro de usuários na tela. 2. O Usuário informa os dados do novo usuário (nome, nome de usuário, e-mail, senha) 3. O sistema valida os dados informados. [A1] 4. O sistema registra o novo usuário. 5. O sistema informa ao Usuário que a operação foi realizada com sucesso. 6. O sistema recarrega a lista de usuários.
Pós-condição:	Um novo usuário é adicionado à base de dados.
Fluxos Alternativos:	• [A1] - Dados Inválidos 1. O sistema informa ao Usuário quais dados estão inválidos (exemplo: e-mail ou usuário já cadastrados). 2. Volta para o passo 2.

A.4 UC04 - Listar Usuários

Objetivo:	Exibe a lista de usuários cadastrados no sistema.
Requisitos:	RF08
Atores:	Usuário
Pré-condição:	Usuário está autenticado e tem a permissão VISUALIZAR USUÁRIOS.
Gatilho:	O Usuário acessa a tela de gerenciamento de usuários.
Fluxo Principal:	1. O sistema recupera a lista de usuários da base de dados. 2. O sistema exibe a lista de usuários na tela com as informações básicas (nome, nome de usuário, e-mail, papel).
Pós-condição:	A lista de usuários é apresentada ao Usuário.

A.5 UC05 - Detalhar Usuário

Objetivo:	Exibe os detalhes de um usuário específico.
Requisitos:	RF08
Atores:	Usuário
Pré-condição:	Usuário está autenticado e tem a permissão VISUALIZAR USUÁRIOS.
Gatilho:	O Usuário clica no nome de um usuário na lista de usuários
Fluxo Principal:	1. O sistema recupera os detalhes do usuário selecionado da base de dados. 2. O sistema exibe as informações completas do usuário na tela (nome, nome de usuário, email, papel, data de criação, etc.).
Pós-condição:	Os detalhes do usuário são apresentados ao Usuário.

A.6 UC06 - Editar Usuário

Objetivo:	Faz a edição das informações de um usuário existente.
Requisitos:	RF08
Atores:	Usuário
Pré-condição:	Usuário está autenticado e tem a permissão EDITAR USUÁRIO.
Gatilho:	O Usuário clica em EDITAR na tela de detalhes do usuário.
Fluxo Principal:	1. O sistema apresenta o formulário de edição preenchido com os dados atuais do usuário. 2. O Usuário altera os dados desejados (nome, nome de usuário, e-mail, papel, etc.). 3. O sistema valida os dados informados. [A1] 4. O sistema atualiza os dados do usuário na base de dados. 5. O sistema informa ao Usuário que a operação foi realizada com sucesso. 6. O sistema reapresenta a tela de detalhes de usuário com os dados atualizados.
Pós-condição:	Os dados do usuário são atualizados na base de dados.
Fluxos Alternativos:	• [A1] - Dados Inválidos 1. O sistema informa ao Usuário quais dados estão inválidos. 2. Volta para o passo 2.

A.7 UC07 - Cadastrar Papel

Objetivo:	Faz o cadastro de um novo papel no sistema.
Requisitos:	RF09
Atores:	Usuário
Pré-condição:	Usuário está autenticado e tem a permissão CADASTRAR PAPEL.
Gatilho:	O Usuário clica no botão ADICIONAR PAPEL na tela de gerenciamento de papéis.
Fluxo Principal:	1. O sistema apresenta o formulário de cadastro de papel na tela. 2. O Usuário informa os dados do novo papel (nome e permissões associadas). 3. O sistema valida os dados informados. [A1] 4. O sistema registra o novo papel na base de dados. 5. O sistema informa ao Usuário que a operação foi realizada com sucesso. 6. O sistema recarrega a lista de papeis.
Pós-condição:	Um novo papel é adicionado à base de dados.
Fluxos Alternativos:	• [A1] - Dados Inválidos 1. O sistema informa ao Usuário quais dados estão inválidos. 2. Volta para o passo 2.

A.8 UC08 - Listar Papéis

Objetivo:	Exibe a lista de papéis cadastrados no sistema.
Requisitos:	RF09
Atores:	Usuário
Pré-condição:	Usuário está autenticado e tem a permissão VISUALIZAR PAPÉIS.
Gatilho:	O Usuário acessa a tela de gerenciamento de papéis.
Fluxo Principal:	1. O sistema recupera a lista de papéis da base de dados. 2. O sistema exibe a lista de papéis na tela com as informações básicas (nome e número de permissões associadas).
Pós-condição:	A lista de papéis é apresentada ao Usuário.

A.9 UC09 - Detalhar Papel

Objetivo:	Exibe os detalhes de um papel específico.
Requisitos:	RF09
Atores:	Usuário
Pré-condição:	Usuário está autenticado e tem a permissão VISUALIZAR PAPÉIS.
Gatilho:	O Usuário clica em um papel na lista de papeis na tela de gerenciamento de papeis.
Fluxo Principal:	1. O sistema recupera os detalhes do papel selecionado da base de dados. 2. O sistema recupera a lista de usuários que possuem aquele papel. 3. O sistema exibe as informações completas do papel na tela (nome, descrição, permissões associadas, usuários vinculados).

Pós-condição:	Os detalhes do papel são apresentados ao Usuário.
----------------------	---

A.10 UC10 - Editar Papel

Objetivo:	Faz a edição das informações de um papel existente.
Requisitos:	RF09
Atores:	Usuário
Pré-condição:	Usuário está autenticado e tem a permissão EDITAR PAPEL.
Gatilho:	O Usuário clica em EDITAR na tela de detalhes do papel.
Fluxo Principal:	1. O sistema apresenta o formulário de edição preenchido com os dados atuais do papel. 2. O Usuário altera os dados desejados (nome, descrição, permissões associadas). 3. O sistema valida os dados informados. [A1] 4. O sistema atualiza os dados do papel na base de dados. 5. O sistema informa ao Usuário que a operação foi realizada com sucesso. 6. O sistema recarrega a página de detalhes do papel com as informações atualizadas
Pós-condição:	Os dados do papel são atualizados na base de dados.
Fluxos Alternativos:	• [A1] - Dados Inválidos 1. O sistema informa ao Usuário quais dados estão inválidos. 2. Volta para o passo 2.

A.11 UC11 - Excluir Papel

Objetivo:	Faz a exclusão de um papel do sistema.
Requisitos:	RF09
Atores:	Usuário
Pré-condição:	Usuário está autenticado e tem a permissão EXCLUIR PAPEL.
Gatilho:	O Usuário clica em EXCLUIR na tela de detalhes do papel.
Fluxo Principal:	1. O sistema solicita a confirmação da exclusão. 2. O Usuário confirma a operação. 3. O sistema verifica se o papel pode ser excluído. [A1] 4. O sistema remove o papel da base de dados. 5. O sistema informa ao Usuário que a operação foi realizada com sucesso. 6. O sistema redireciona o Usuário para a página de lista de pepeis.
Pós-condição:	O papel é removido da base de dados.
Fluxos Alternativos:	• [A1] - Exclusão não permitida 1. O sistema informa ao Usuário que o papel não pode ser excluído (exemplo: está vinculado a usuários). 2. O caso de uso é encerrado.

A.12 UC12 - Cadastrar Transformador

Objetivo:	Faz o cadastro de um novo transformador no sistema.
Requisitos:	RF01
Atores:	Usuário
Pré-condição:	Usuário está autenticado e tem a permissão CADASTRAR TRANSFORMADOR.
Gatilho:	O Usuário clica no botão ADICIONAR TRANSFORMADOR na tela de gerenciamento de transformadores.
Fluxo Principal:	1. O sistema apresenta o formulário de cadastro de transformador na tela. 2. O Usuário informa os dados do novo transformador (identificador, modelo, potência, local de instalação, etc.). 3. O sistema valida os dados informados. [A1] 4. O sistema registra o novo transformador na base de dados. 5. O sistema informa ao Usuário que a operação foi realizada com sucesso. 6. O sistema recarrega a lista de transformadores.
Pós-condição:	Um novo transformador é adicionado à base de dados.
Fluxos Alternativos:	• [A1] - Dados Inválidos 1. O sistema informa ao Usuário quais dados estão inválidos. 2. Volta para o passo 2.

A.13 UC13 - Listar Transformadores

Objetivo:	Exibe a lista de transformadores cadastrados no sistema.
Requisitos:	RF01
Atores:	Usuário
Pré-condição:	Usuário está autenticado e tem a permissão VISUALIZAR TRANSFORMADORES.
Gatilho:	O Usuário acessa a tela de gerenciamento de transformadores.
Fluxo Principal:	1. O sistema recupera a lista de transformadores da base de dados. (O usuário pode filtrar por localização, potência, fabricante, status de operação e diagnostico da última medição) 2. O sistema exibe a lista de transformadores na tela com as informações básicas (identificador, modelo, local de instalação).
Pós-condição:	A lista de transformadores é apresentada ao Usuário.

A.14 UC14 - Detalhar Transformador

Objetivo:	Exibe os detalhes de um transformador específico.
Requisitos:	RF01
Atores:	Usuário
Pré-condição:	Usuário está autenticado e tem a permissão VISUALIZAR TRANSFORMADORES.
Gatilho:	O Usuário clica em um transformador na lista de transformadores.
Fluxo Principal:	1. O sistema recupera os detalhes do transformador selecionado da base de dados. 2. O sistema recupera a lista de medições cromatográficas do transformador. 3. O sistema exibe as informações completas do transformador na tela (identificador, modelo, potência, local de instalação, status de manutenção, etc.) e a lista com as medições cromatográficas e diagnósticos.
Pós-condição:	Os detalhes do transformador são apresentados ao Usuário.

A.15 UC15 - Editar Transformador

Objetivo:	Faz a edição das informações de um transformador existente.
Requisitos:	RF01
Atores:	Usuário
Pré-condição:	Usuário está autenticado e tem a permissão EDITAR TRANSFORMADOR.
Gatilho:	O Usuário clica em EDITAR na tela de detalhes do transformador.
Fluxo Principal:	1. O sistema apresenta o formulário de edição preenchido com os dados atuais do transformador. 2. O Usuário altera os dados desejados (identificador, modelo, potência, local de instalação, etc.). 3. O sistema valida os dados informados. [A1] 4. O sistema atualiza os dados do transformador na base de dados. 5. O sistema informa ao Usuário que a operação foi realizada com sucesso. 6. O sistema recarrega a página de detalhes do transformador com as informações atualizadas.
Pós-condição:	Os dados do transformador são atualizados na base de dados.
Fluxos Alternativos:	• [A1] - Dados Inválidos 1. O sistema informa ao Usuário quais dados estão inválidos. 2. Volta para o passo 2.

A.16 UC16 - Excluir Transformador

Objetivo:	Faz a exclusão de um transformador do sistema.
Requisitos:	RF01
Atores:	Usuário
Pré-condição:	Usuário está autenticado e tem a permissão EXCLUIR TRANSFORMADOR.
Gatilho:	O Usuário clica em EXCLUIR na tela de detalhes do transformador.
Fluxo Principal:	1. O sistema solicita a confirmação da exclusão. 2. O Usuário confirma a operação. 3. O sistema verifica se o transformador pode ser excluído. 4. O sistema remove todas as medições cromatográficas do transformador da base de dados. 5. O sistema remove o transformador da base de dados. 6. O sistema informa ao Usuário que a operação foi realizada com sucesso. 7. O sistema direciona o Usuário para a página de lista de transformadores.
Pós-condição:	O transformador e suas medições cromatográficas são removidas da base de dados.

A.17 UC17 - Cadastrar Medição

Objetivo:	Faz o cadastro manual de uma nova medição no sistema.
Requisitos:	RF02, RF03
Atores:	Usuário
Pré-condição:	Usuário está autenticado e tem a permissão CADASTRAR MEDIÇÃO.
Gatilho:	O Usuário clica no botão ADICIONAR MEDIÇÃO na lista de medições na tela de detalhes de transformador ou na tela de listagem geral de medições.
Fluxo Principal:	1. O sistema apresenta o formulário de cadastro de medição na tela. 2. O Usuário informa os dados da medição (data, valores, etc.). 3. O sistema valida os dados informados. [A1] 4. O sistema gera os diagnósticos da medição utilizando os métodos disponíveis. 5. O sistema registra a nova medição com os diagnósticos na base de dados. [A2] 6. O sistema informa ao Usuário que a operação foi realizada com sucesso. 7. O sistema recarrega a lista de medições.
Pós-condição:	Uma nova medição é adicionada à base de dados.
Fluxos Alternativos:	• [A1] - Dados Inválidos 1. O sistema informa ao Usuário quais dados estão inválidos. 2. Volta para o passo 2.

A.18 UC18 - Detalhar Medição

Objetivo:	Exibe os detalhes de uma medição específica.
Requisitos:	RF02
Atores:	Usuário
Pré-condição:	Usuário está autenticado e tem a permissão VISUALIZAR MEDIÇÕES.
Gatilho:	O Usuário clica em uma medição na lista de medições na tela de detalhes de transformador ou na tela de listagem geral de medições.
Fluxo Principal:	1. O sistema recupera os detalhes da medição selecionada da base de dados. 2. O sistema exibe as informações completas da medição na tela (data, valores, diagnósticos, etc.).
Pós-condição:	Os detalhes da medição são apresentados ao Usuário.

A.19 UC19 - Editar Medição

Objetivo:	Faz a edição das informações de uma medição existente.
Requisitos:	RF02, RF03
Atores:	Usuário
Pré-condição:	Usuário está autenticado e tem a permissão EDITAR MEDIÇÃO.
Gatilho:	O Usuário clica em EDITAR na tela de detalhes da medição.
Fluxo Principal:	1. O sistema apresenta o formulário de edição preenchido com os dados atuais da medição. 2. O Usuário altera os dados desejados (data, tipo de medição, valores, etc.). 3. O sistema valida os dados informados. [A1] 4. O sistema gera os diagnósticos da medição utilizando os métodos disponíveis. 5. O sistema atualiza os dados da medição com os diagnósticos na base de dados. 6. O sistema informa ao Usuário que a operação foi realizada com sucesso. 7. O sistema recarrega a página de detalhes da medição com as informações atualizadas.
Pós-condição:	Os dados da medição são atualizados na base de dados.
Fluxos Alternativos:	• [A1] - Dados Inválidos 1. O sistema informa ao Usuário quais dados estão inválidos. 2. Volta para o passo 2.

A.20 UC20 - Excluir Medição

Objetivo:	Faz a exclusão de uma medição do sistema.
Requisitos:	RF02
Atores:	Usuário
Pré-condição:	Usuário está autenticado e tem a permissão EXCLUIR MEDIÇÃO.
Gatilho:	O Usuário clica em EXCLUIR na tela de detalhes da medição.
Fluxo Principal:	1. O sistema solicita a confirmação da exclusão. 2. O Usuário confirma a operação. 3. O sistema remove a medição da base de dados. 4. O sistema informa ao Usuário que a operação foi realizada com sucesso. 5. O sistema direciona o Usuário para a página de lista de medições.
Pós-condição:	A medição é removida da base de dados.

A.21 UC21 - Gerar Relatório de Diagnóstico de Transformador

Objetivo:	Permite gerar um relatório detalhado de diagnóstico para um transformador específico.
Requisitos:	RF04
Atores:	Usuário
Pré-condição:	Usuário está autenticado e tem a permissão GERAR RELATÓRIO.
Gatilho:	O Usuário seleciona um a aba de relatórios dentro da página de detalhes de transformador e clica em GERAR RELATÓRIO.
Fluxo Principal:	1. O sistema consulta os dados históricos e as medições associadas ao transformador. 2. O sistema gera o relatório detalhado com base nos dados disponíveis (medições e diagnósticos). 3. O sistema salva o relatório no banco de dados. 4. O sistema adiciona o relatório gerado a lista de relatórios na tela. 5. o sistema informa que a operação foi um sucesso.
Pós-condição:	Um novo relatório de transformador é adicionado a base de dados.

A.22 UC22 - Gerar Relatório Geral de Todos os Transformadores

Objetivo:	Permite gerar um relatório consolidado com o diagnóstico de todos os transformadores cadastrados no sistema.
Requisitos:	RF04
Atores:	Usuário
Pré-condição:	Usuário está autenticado e tem a permissão GERAR RELATÓRIO.
Gatilho:	O Usuário clica no botão GERAR RELATÓRIO GLOBAL na aba de relatórios na tela de gerenciamento de transformadores.
Fluxo Principal:	1. O sistema consulta os dados históricos e as medições associadas a todos os transformadores. 2. O sistema gera um relatório consolidado com informações relevantes (medições, status de manutenção, diagnósticos, etc.). 3. O sistema salva o relatório no banco de dados. 4. O sistema adiciona o relatório gerado a lista de relatórios na tela. 5. o sistema informa que a operação foi um sucesso.
Pós-condição:	Um novo relatório geral é adicionado a base de dados.

A.23 UC23 - Exportar Relatório em PDF

Objetivo:	Permite ao Usuário exportar um relatório em PDF para imprimir ou visualizar
Requisitos:	RF05
Atores:	Usuário
Pré-condição:	Usuário está autenticado e tem a permissão VISUALIZAR RELATÓRIOS
Gatilho:	O Usuário acessa a lista de relatórios gerais na tela de gerenciamento de transformadores ou acessa a lista de relatórios dentro da tela de detalhes de transformador, e clica no relatório que deseja exportar.
Fluxo Principal:	1. O sistema recupera os dados do relatório. 2. O sistema renderiza os dados do relatório em formato PDF de forma que possa ser visualizado ou baixado.
Pós-condição:	O Usuário tem acesso ao relatório em PDF para visualizar, baixar e imprimir.

A.24 UC24 - Visualizar Dashboard

Objetivo:	Permite ao Usuário acessar um dashboard com informações resumidas e indicadores-chave sobre os transformadores.
Requisitos:	RF10
Atores:	Usuário
Pré-condição:	Usuário está autenticado e tem a permissão VISUALIZAR DASHBOARD.
Gatilho:	O Usuário acessa a tela inicial de dashboard.
Fluxo Principal:	1. O sistema consulta os dados mais recentes da base de dados (medições, status, etc.). 2. O sistema gera os indicadores-chave, como: • Número total de transformadores cadastrados. • Estatísticas de medições recentes. • Status de manutenções pendentes. 3. O sistema apresenta o dashboard ao Usuário com gráficos.
Pós-condição:	O Usuário tem acesso a informações resumidas e atualizadas sobre os transformadores.

APÊNDICE B – FORMULÁRIO DE INSCRIÇÃO PARA O TESTE DE USABILIDADE

Este apêndice apresenta a estrutura, o texto de apresentação e as perguntas iniciais de triagem do formulário eletrônico utilizado para o recrutamento dos voluntários da avaliação de usabilidade.

Inscrição: Teste de Usabilidade - Plataforma PowerTam

Texto de Apresentação:

Olá! Este formulário visa selecionar voluntários para participar do teste de usabilidade da plataforma PowerTam, um sistema web desenvolvido para o diagnóstico de falhas em transformadores de potência.

Esta avaliação de usabilidade é parte integrante do desenvolvimento do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à Universidade Federal do Maranhão (UFMA).

Informações Acadêmicas:

Título: DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA WEB PAR DIAGNOSTICO DE FALHAS INCIPIENTES EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA Discente (Autor): Rodrigo de França de Sá Menezes

Docente Orientador: Prof. Dr. Shigeaki Leite de Lima

Curso: Engenharia da Computação

O teste será realizado de forma totalmente remota (via Google Meet), com duração estimada de 20 minutos. Durante a sessão, você receberá um roteiro com algumas tarefas simples para executar na interface do sistema. Sua participação é fundamental para avaliarmos a facilidade de uso da plataforma. Desde já, agradecemos a sua colaboração!

Questões do Formulário

1. Endereço de e-mail

Tipo de resposta: Resposta curta (Obrigatória)

2. Termo de Aceite e Entendimentos

Tipo de resposta: Caixa de Seleção (Todos os itens são obrigatórios)

- ☐ Entendo que meus dados pessoais não serão divulgados e que os dados da pesquisa serão totalmente anonimizados no relatório final do TCC.
- ☐ Concordo com a gravação em áudio e vídeo da sessão de testes (via Google Meet) para fins de análise posterior.
- ☐ Concordo em responder ao questionário de usabilidade (SUS) imediatamente após a conclusão do teste.

APÊNDICE C – QUESTIONÁRIO DE USABILIDADE PÓS-TESTE (SUS)

Este apêndice apresenta o questionário eletrônico aplicado aos participantes imediatamente após a conclusão das tarefas do roteiro de testes. O formulário é composto pelas 10 afirmações da escala psicométrica *System Usability Scale* (SUS) — avaliadas em uma escala Likert de 1 (Discordo Totalmente) a 5 (Concordo Totalmente) — seguidas por três perguntas qualitativas abertas.

Avaliação de Usabilidade - Plataforma PowerTam

Texto de Orientação aos Participantes:

Obrigado por concluir as tarefas do teste! Por favor, responda às questões abaixo com base na sua experiência real de uso da plataforma hoje.

Questões Qualitativas Abertas

Ao final das afirmações de escala fixa, foram disponibilizados três campos textuais para livre preenchimento por parte do usuário:

11. O que você achou mais fácil ou positivo na plataforma?

Tipo de resposta: Parágrafo / Resposta longa (Obrigatória)

12. Qual parte ou funcionalidade você achou mais confusa ou difícil de interagir?

Tipo de resposta: Parágrafo / Resposta longa (Obrigatória)

13. Espaço para sugestões de melhorias ou comentários gerais.

Tipo de resposta: Parágrafo / Resposta longa (Opcional)

Tabela 25: Afirmações da Escala SUS incluídas no formulário

Nº	Afirmção	Escala Likert				
		1	2	3	4	5
1	Eu acho que gostaria de usar este sistema frequentemente.	()	()	()	()	()
2	Eu achei o sistema desnecessariamente complexo.	()	()	()	()	()
3	Eu achei o sistema fácil de usar.	()	()	()	()	()
4	Eu acho que precisaria de ajuda de uma pessoa com conhecimentos técnicos para usar este sistema.	()	()	()	()	()
5	Eu achei que as várias funções deste sistema estavam muito bem integradas.	()	()	()	()	()
6	Eu achei que este sistema apresentava muita inconsistência.	()	()	()	()	()
7	Eu imagino que a maioria das pessoas aprenderia a usar este sistema muito rapidamente.	()	()	()	()	()
8	Eu achei o sistema muito cansativo de usar.	()	()	()	()	()
9	Eu me senti muito confiante ao usar o sistema.	()	()	()	()	()
10	Eu precisei aprender muitas coisas novas antes de conseguir usar o sistema.	()	()	()	()	()

Legenda da Escala: 1: Discordo totalmente | 2: Discordo parcialmente | 3: Neutro | 4: Concordo parcialmente | 5: Concordo totalmente.

APÊNDICE D – ROTEIRO DE TAREFAS DO TESTE DE USABILIDADE

Este apêndice apresenta o roteiro de testes oficial fornecido aos participantes durante as sessões de avaliação da plataforma PowerTam. O documento reúne as instruções operacionais e as seis tarefas sequenciais que serviram de base para a análise comportamental e posterior medição do score SUS.

Roteiro de Testes – Plataforma PowerTam

Plataforma Web para Monitoramento e Diagnóstico de Falhas em Transformadores de Potência

Instruções Gerais para o Participante

- **01. Atenção ao Enunciado:** Leia com atenção o enunciado de cada tarefa antes de executá-la.
- **02. Autonomia:** Execute as ações de forma autônoma na interface do sistema. O aplicador não poderá tirar dúvidas durante o processo.
- **03. Sinalização Obrigatória:** Ao finalizar cada tarefa, diga verbalmente “**Concluído**”. Após sinalizar, avance imediatamente para a próxima etapa.

Bloco de Tarefas Sequenciais

1. Tarefa 01: Autenticação e Reconhecimento

Objetivo: Acessar a plataforma e avaliar as informações iniciais da frota de transformadores.

- **01. Acesso ao Sistema:** Acesse o site do sistema no navegador através do link:
<<https://powertam-ufma.onrender.com/>>

- **02. Login no Sistema:** Insira as seguintes credenciais de acesso na tela inicial:
 - **E-mail:** gerente@powertam.com
 - **Senha:** 123456
- **03. Análise do Dashboard:** Localize visualmente no painel do sistema: o total de transformadores cadastrados, o total de medições cadastradas e o total de transformadores por status de operação (*Em Operação* e *Fora de Operação*).

2. Tarefa 02: Registrar Novo Transformador

Objetivo: Registrar um novo transformador na base de dados do sistema.

- **01. Navegação:** Navegue até a tela de listagem de Transformadores e clique no botão “Registrar”.
- **02. Preencher Dados:** Preencha o formulário estritamente com os seguintes dados técnicos:
 - **N. de Série:** TR-MIG-2026
 - **Local:** SE SÃO LUÍS Centro
 - **Status:** Em Operação
 - **Fabricante:** WEG | **Ano:** 2021
 - **Potência:** 25 MVA | **Tensão:** 69 kV
 - **Volume de Óleo:** 12000 L | **Impedância:** 8.5 %
- **03. Confirmação:** Salve o cadastro e confirme se o novo ativo aparece na listagem principal (use o campo de busca se necessário).

3. Tarefa 03.1: Registrar Medição e Diagnóstico (Primeira Análise)

Objetivo: Registrar os dados da primeira análise cromatográfica de um transformador e verificar os diagnósticos gerados.

- **01. Localização:** Localize o transformador com número de série TR-MIG-2026 na listagem e clique nele para acessar a tela de detalhes.
- **02. Localização da Seção:** Na página de detalhes do transformador, localize e acesse a aba de medições. Nesta seção, localize e clique no botão de registrar medição.

- **03. Inserção de Dados:** Preencha os seguintes parâmetros de controle:

– **Data:** 01/05/2025 | **Hora:** 09:30

- **Gases dissolvidos (ppm):**

H_2 : 125 | CH_4 : 1 | C_2H_6 : 1 | C_2H_4 : 2

C_2H_2 : 1 | CO : 1 | CO_2 : 10

- **04. Diagnóstico:** Salve o registro e observe os resultados gerados em tempo real pelos métodos integrados (**IEC 60599** e **Método de LIMA**).

4. Tarefa 03.2: Registrar Medição e Diagnóstico (Segunda Análise)

Objetivo: Registrar os dados da segunda análise cromatográfica de um transformador e verificar a evolução dos diagnósticos.

- **01. Novo Registro:** Na mesma tela de medições do ativo, clique novamente no botão de registrar medição.

- **02. Inserção de Dados:** Preencha os novos parâmetros coletados:

– **Data:** 09/06/2026 | **Hora:** 08:30

- **Gases dissolvidos (ppm):**

H_2 : 500 | CH_4 : 58 | C_2H_6 : 6 | C_2H_4 : 16

C_2H_2 : 0 | CO : 2072 | CO_2 : 7065

- **03. Diagnóstico:** Salve o registro e observe as alterações nos resultados fornecidos pelos métodos integrados (**IEC 60599** e **Método de LIMA**).

5. Tarefa 04: Geração e Exportação de Relatório

Objetivo: Gerar e baixar o relatório individual do equipamento em formato digital utilizável.

- **01. Emissão do Laudo:** Ainda na tela de detalhes do ativo TR-MIG-2026, localize a aba de relatórios, clique em “Gerar Relatório” e solicite a emissão referente ao período completo.
- **02. Exportação:** Clique no ícone de visualizar para realizar a exportação do documento gerado para o formato **PDF**. (*Nota: Caso o relatório não abra imediatamente, verifique se o bloqueador de pop-ups do seu navegador está ativado*).

- **03. Verificação:** Confirme visualmente se o documento PDF gerado contém o gráfico de análise temporal e a respectiva legenda de falhas.

6. Tarefa 05: Configuração de Papel de Acesso (RBAC)

Objetivo: Criar um novo perfil com restrições de permissões no sistema.

- **01. Navegação:** Acesse o menu lateral e entre na área de gerenciamento de **Papéis e Permissões** (Controle de Acesso).
- **02. Configuração:** Crie um novo papel utilizando estritamente as seguintes definições:
 - **Nome do Papel:** Estagiário
 - **Permissões (marque apenas estas duas):** Visualizar Relatórios e Ver o Dashboard.
- **03. Finalização:** Salve as alterações para disponibilizar o papel na atribuição de usuários.

7. Tarefa 06: Gestão de Usuários (Cadastrar e Atribuir Papel)

Objetivo: Cadastrar uma nova credencial no sistema associada ao perfil recém-criado.

- **01. Navegação:** Navegue até a tela de gerenciamento de **Usuários**.
- **02. Cadastro:** Clique no botão para adicionar um novo usuário e preencha com as informações:
 - **Nome:** Lucas Silva
 - **E-mail:** lucas.estagio@powertam.com
 - **Papel:** Selecione a opção Estagiário.
- **03. Finalização:** Conclua o cadastro na base de dados para registrar e ativar o novo acesso.

— **Fim do Roteiro de Tarefas** —

O participante era direcionado para responder ao questionário psicométrico pós-teste (Escala SUS).