

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
MINAS GERAIS - *CAMPUS* BETIM
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Thiago Viana Dornelas

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA PARA MONITORAMENTO DE
DADOS DE ENSAIOS ELÉTRICOS EM SUBESTAÇÕES MÓVEIS**

Betim
2026

THIAGO VIANA DORNELAS

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA PARA MONITORAMENTO DE DADOS DE ENSAIOS ELÉTRICOS EM SUBESTAÇÕES MÓVEIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Me. Victor Alves Silva e Melo

Betim
2026

FICHA CATALOGRÁFICA

D713d Dornelas, Thiago Viana

Desenvolvimento de sistema para monitoramento de dados de ensaios elétricos em subestações móveis / Thiago Viana Dornelas. – 2026.

75 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim, 2026.

Orientação: Prof. Me. Victor Alves Silva e Melo

1. Subestações elétricas. 2. Ensaios elétricos. 3. Banco de dados. 4. Engenharia de Controle e Automação. I. Dornelas, Thiago Viana. II. Título.

CDU: 621.313

Thiago Viana Dornelas

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA PARA MONITORAMENTO DE DADOS DE ENSAIOS ELÉTRICOS EM SUBESTAÇÕES MÓVEIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Aprovado em: 20/ 07/ 2026 pela banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **VICTOR ALVES SILVA E MELO**
Data: 20/07/2026 19:21:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Victor Alves Silva e Melo (Orientador) - IFMG

Documento assinado digitalmente
 **MAURICIO MONTEIRO DA SILVA**
Data: 20/07/2026 21:27:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Mauricio Monteiro da Silva - IFMG

Documento assinado digitalmente
 **WELINTON LA FONTAINE LOPES**
Data: 21/07/2026 04:46:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Welinton La Fontaine Lopes - IFMG

RESUMO

O sistema elétrico brasileiro possui infraestrutura extensa e geograficamente distribuída, na qual a continuidade do fornecimento de energia é requisito fundamental. Nesse cenário, as subestações móveis atuam como soluções estratégicas para situações de contingência, manutenções programadas e eventos especiais, sendo transportadas e instaladas rapidamente em diferentes pontos da rede elétrica. Dado o processo repetitivo de transporte, montagem e desmontagem a que esses equipamentos são submetidos, a realização de ensaios elétricos no comissionamento e ao longo de sua vida útil é fundamental para verificar a integridade dos transformadores, disjuntores, cabos e demais componentes. Apesar dessa importância, nem sempre as concessionárias de energia dispõem de sistemas estruturados para a gestão desses ensaios, recorrendo a registros manuais em cadernos físicos ou planilhas avulsas, o que compromete a rastreabilidade das informações, inviabiliza análises comparativas e impede a identificação de tendências de degradação dos equipamentos ao longo do tempo. Dessa forma, o objetivo deste trabalho consiste em digitalizar e automatizar o processo de gestão de ensaios elétricos em subestações móveis por meio do desenvolvimento de uma aplicação *web* integrada a um banco de dados relacional PostgreSQL, utilizando o *framework Django* com linguagem *Python*. Diferentemente de um simples repositório de dados, o sistema foi concebido como uma ferramenta de suporte à decisão de engenharia, sendo suas principais funcionalidades a comparação automatizada entre ensaios de referência de fábrica e medições de campo com classificação de resultados em categorias de conformidade, e a geração de *dashboards* analíticos que consolidam o histórico de ensaios e evidenciam não conformidades que demandam atenção técnica. Para validação, o banco de dados foi populado com informações cadastrais e valores de ensaios de referência reais da CEMIG, complementados por resultados de campo gerados para fins de teste, totalizando 1.428 itens de ensaio cadastrados. Os resultados demonstram que o sistema atendeu integralmente aos requisitos estabelecidos, com destaque para o algoritmo de classificação automática, que identificou não conformidades críticas e forneceu subsídio técnico concreto para a tomada de decisão, como a recomendação de não energização de uma subestação móvel até a realização de manutenção corretiva em seu disjuntor de média tensão, constituindo uma ferramenta efetiva de suporte para as equipes de operação e manutenção.

Palavras-chave: Subestações Móveis; Ensaios Elétricos; Gestão de Ensaios; Django; PostgreSQL.

ABSTRACT

The Brazilian electrical system has an extensive and geographically distributed infrastructure, in which the continuity of energy supply is a fundamental requirement. In this context, mobile substations act as strategic solutions for contingency situations, scheduled maintenance, and special events, being transported and installed quickly at different points of the electrical grid. Given the repetitive process of transportation, assembly, and disassembly to which this equipment are subjected, the performance of electrical tests during commissioning and throughout their useful life is essential to verify the integrity of transformers, circuit breakers, cables, and other components. Despite this importance, energy utilities do not always have structured systems for managing these tests, resorting to manual records in physical notebooks or scattered spreadsheets, which compromises information traceability, makes comparative analyses unfeasible, and prevents the identification of equipment degradation trends over time. Therefore, the objective of this work is to digitize and automate the electrical test management process in mobile substations through the development of a web application integrated with a PostgreSQL relational database, using the Django framework with the Python language. Unlike a simple data repository, the system was conceived as an engineering decision support tool, with its main functionalities being the automated comparison between factory reference tests and field measurements with classification of results into compliance categories, and the generation of analytical dashboards that consolidate the test history and highlight non-conformities requiring technical attention. For validation, the database was populated with registration information and real reference test values from CEMIG, supplemented by field results generated for testing purposes, totaling 1,428 registered test items. The results demonstrate that the system fully met the established requirements, with emphasis on the automatic classification algorithm, which identified critical non-conformities and provided concrete technical support for decision-making, such as the recommendation against energizing a mobile substation until corrective maintenance was performed on its medium-voltage circuit breaker, constituting an effective support tool for operation and maintenance teams.

Keywords: Mobile Substations; Electrical Tests; Test Management; Django; PostgreSQL.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama unifilar básico de uma subestação	17
Figura 2 – Transformador de força	18
Figura 3 – Tipos construtivos de TP: Alta tensão e média tensão	19
Figura 4 – TC tipo bucha	20
Figura 5 – Tipos de disjuntores	21
Figura 6 – Tipos de seccionadoras: abertura vertical e dupla abertura lateral	22
Figura 7 – Para-raios	23
Figura 8 – Centro de Operação da Distribuição CEMIG	24
Figura 9 – Subestação móvel	25
Figura 10 – Megômetro	27
Figura 11 – Exemplo de um ensaio de resistência de isolamento	28
Figura 12 – Exemplo de um ensaio de relação de transformação	30
Figura 13 – Ensaio de resistência dos contatos de um disjuntor	31
Figura 14 – Ensaio de oscilografia de um disjuntor	32
Figura 15 – Ambiente simplificado de um banco de dados	33
Figura 16 – Diagrama Entidade-Relacionamento	37
Figura 17 – Notação pé de galinha	37
Figura 18 – Exemplo de cardinalidade no DER	38
Figura 19 – Fluxo MVT do <i>Django</i>	39
Figura 20 – Fluxo de Funcionamento <i>Django</i>	41
Figura 21 – Diagrama Entidade-Relacionamento	46
Figura 22 – Exemplo de tela PostgreSQL	47
Figura 23 – Código para criação da entidade Ensaio_referencia	47
Figura 24 – Estrutura base do projeto <i>Django</i>	49
Figura 25 – Estrutura da Aplicação Ensaaios	50
Figura 26 – Tela de Autenticação	54
Figura 27 – Tela inicial	55
Figura 28 – Novo Ensaio de Campo	56
Figura 29 – Registro de Resultados de Ensaaios	56
Figura 30 – Tela Ensaaios de Referência	57
Figura 31 – Exemplo de Resultados de Referência	58
Figura 32 – Lista de campanhas registradas	59
Figura 33 – Exemplo prático de uma consulta	59
Figura 34 – Tela para seleção de comparação com ensaios de referência	60
Figura 35 – Exemplo de comparação Referência vs Campo	61
Figura 36 – Tela para seleção de comparação Campo vs Campo	62
Figura 37 – Exemplo de comparação Campo vs Campo	63
Figura 38 – Gráficos com Indicadores Gerais	64

Figura 39 – Tabela Últimos Ensaios Críticos	65
Figura 40 – Distribuição Geográfica e por SE Móvel	66
Figura 41 – Tipos de Ensaio com Desvio	66
Figura 42 – Distribuição por Categoria e Produtividade por Operador	67
Figura 43 – Tela inicial da interface administrativa	68
Figura 44 – Tela de listagem entidade Operadores	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Tensões de ensaio conforme tensão nominal do equipamento	27
Tabela 2	– Instância da relação Operador	34
Tabela 3	– Levantamento de requisitos do BD	43
Tabela 4	– Operador	43
Tabela 5	– SE_movel	44
Tabela 6	– tipo_ensaio	44
Tabela 7	– Ensaio_referencia	44
Tabela 8	– Ensaio_campo	45
Tabela 9	– Resultados_campo	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BD	Banco de Dados
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CLPs	Controladores Lógicos Programáveis
COD	Centro de Operação da Distribuição da CEMIG
DER	Diagrama Entidade-Relacionamento
FK	<i>Foreign Key</i>
HTML	Linguagem de Marcação de Hipertexto
HTTP	Protocolo de Transferência de Hipertexto
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IEDs	Dispositivos Eletrônicos Inteligentes
IHM	Interface Homem-Máquina
MER	Modelo Entidade-Relacionamento
MRE	Medição de Resistência Estática de Contato
MMHC	Módulo de Manobra Híbrido Compacto
MVT	<i>Model-View-Template</i>
NBR	Normas Brasileiras Regulamentadoras
ODAF	Óleo Direcionado e Ar Forçado
ORM	<i>Object-Relational Mapping</i>
PK	<i>Primary Key</i>
SCADA	Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SGBD	Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados
SiC	Carboneto de Silício
SQL	Linguagem de Consulta Estruturada

TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
URL	Localizador Uniforme de Recursos
TSA	Transformador de Serviços Auxiliares
TTR	<i>Transformer Turns Ratio</i>
RTUs	Unidades de Terminal Remoto
VLF	<i>Very Low Frequency</i>
ZnO	Óxido de Zinco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	15
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo geral</i>	<i>15</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos específicos</i>	<i>15</i>
1.2	Organização do Texto	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Subestações Elétricas	16
<i>2.1.1</i>	<i>Principais equipamentos de uma subestação</i>	<i>17</i>
<i>2.1.1.1</i>	<i>Transformador de força</i>	<i>17</i>
<i>2.1.1.2</i>	<i>Transformador de potencial</i>	<i>18</i>
<i>2.1.1.3</i>	<i>Transformador de corrente</i>	<i>19</i>
<i>2.1.1.4</i>	<i>Disjuntores</i>	<i>20</i>
<i>2.1.1.5</i>	<i>Chave seccionadora</i>	<i>21</i>
<i>2.1.1.6</i>	<i>Para-raios</i>	<i>22</i>
<i>2.1.1.7</i>	<i>Sistema de automação e comunicação em subestação</i>	<i>23</i>
2.2	Subestações Móveis	24
2.3	Ensaio em Subestações Móveis	26
<i>2.3.1</i>	<i>Resistência de isolamento</i>	<i>26</i>
<i>2.3.2</i>	<i>Tensão aplicada em cabos isolados</i>	<i>28</i>
<i>2.3.3</i>	<i>Relação de transformação</i>	<i>29</i>
<i>2.3.4</i>	<i>Resistência de contato em equipamentos de manobra</i>	<i>30</i>
<i>2.3.5</i>	<i>Oscilografia em equipamentos de manobra</i>	<i>31</i>
2.4	Banco de Dados	33
<i>2.4.1</i>	<i>Modelo relacional</i>	<i>34</i>
<i>2.4.1.1</i>	<i>Chaves</i>	<i>35</i>
<i>2.4.1.2</i>	<i>Restrições de Integridade</i>	<i>35</i>
<i>2.4.2</i>	<i>Modelo Entidade-Relacionamento</i>	<i>36</i>
<i>2.4.2.1</i>	<i>Diagrama Entidade-Relacionamento</i>	<i>36</i>
2.5	Django	38

3	METODOLOGIA	42
3.1	Modelagem e Implementação do Banco de Dados	42
<i>3.1.1</i>	<i>Levantamento de requisitos</i>	<i>42</i>
<i>3.1.2</i>	<i>Modelo Entidade-Relacionamento</i>	<i>43</i>
3.1.2.1	Diagrama Entidade-Relacionamento	46
<i>3.1.3</i>	<i>Implementação do Banco de Dados</i>	<i>46</i>
3.1.3.1	Preenchimento do banco de dados	48
3.2	Desenvolvimento da aplicação Web	48
<i>3.2.1</i>	<i>Projeto Django</i>	<i>48</i>
<i>3.2.2</i>	<i>Aplicação Django</i>	<i>49</i>
3.2.2.1	Principais funções do sistema	51
4	RESULTADOS	54
4.1	Tela Autenticação	54
4.2	Tela Início	55
4.3	Novo Ensaio de Campo	55
4.4	Tela Ensaios de Referência	56
4.5	Tela Consultar Ensaios	58
4.6	Tela de Comparação de Resultados	59
<i>4.6.1</i>	<i>Comparação Referência vs Campo</i>	<i>60</i>
4.6.1.1	Análise Técnica dos Resultados Críticos Identificados	61
<i>4.6.2</i>	<i>Comparação Campo vs Campo</i>	<i>62</i>
4.7	Tela de Dashboard	63
<i>4.7.1</i>	<i>Indicadores Gerais</i>	<i>64</i>
<i>4.7.2</i>	<i>Últimos Ensaios Críticos</i>	<i>64</i>
<i>4.7.3</i>	<i>Distribuição Geográfica e por SE Móvel</i>	<i>65</i>
<i>4.7.4</i>	<i>Tipos de Ensaio com Desvio</i>	<i>66</i>
<i>4.7.5</i>	<i>Distribuição por Categoria e Produtividade por Operador</i>	<i>67</i>
<i>4.7.6</i>	<i>Interface Administrativa</i>	<i>67</i>
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	70
5.1	Trabalhos Futuros	70

REFERÊNCIAS 71

ANEXO A – CÓDIGOS 74

1 INTRODUÇÃO

O sistema elétrico brasileiro é caracterizado por uma infraestrutura extensa e geograficamente distribuída, na qual a continuidade do fornecimento de energia constitui requisito fundamental para o funcionamento da sociedade e da economia (ANEEL, 2021). Nesse cenário, as subestações móveis atuam como soluções estratégicas para situações de contingência, manutenções programadas, ampliações de rede e eventos especiais, sendo capazes de ser transportadas e instaladas rapidamente em diferentes pontos da rede elétrica (LOPEZ-ROLDAN *et al.*, 2006; BISEN; SINGH, 2016).

Diferentemente das subestações fixas, as subestações móveis são projetadas para ser transportadas e instaladas rapidamente em diferentes localidades, o que exige especial atenção à sua integridade física e funcional após cada deslocamento. A operação satisfatória de uma subestação móvel depende da sobrevivência ao processo repetitivo de transporte, montagem e desmontagem de diversos tipos de equipamentos, sendo necessário que não apenas os equipamentos individuais, mas também suas ancoragens, serviços e interconexões sejam bem dimensionados para suportar cargas estáticas e dinâmicas decorrentes do transporte (LOPEZ-ROLDAN *et al.*, 2006).

Por essa razão, a realização de ensaios elétricos no comissionamento e ao longo da vida útil desses equipamentos é fundamental, permitindo verificar se transformadores, disjuntores, cabos e demais componentes mantêm suas características elétricas dentro dos limites especificados pelo fabricante e pelas normas técnicas aplicáveis. Apesar dessa importância, ocorre de concessionárias não disporem de sistemas estruturados para a gestão desses ensaios, recorrendo a registros manuais em cadernos físicos ou planilhas avulsas, o que compromete a rastreabilidade das informações, inviabiliza análises comparativas entre campanhas de ensaios e dificulta a identificação de tendências de degradação dos equipamentos ao longo do tempo.

Nesse ínterim, a aplicação de ferramentas tecnológicas para a gestão desses ensaios torna-se igualmente importante. Um sistema estruturado de gestão permite acompanhar o histórico de campanhas realizadas, monitorar a evolução dos resultados ao longo do tempo, identificar tendências de degradação dos equipamentos e subsidiar decisões técnicas com base em dados organizados e rastreáveis. Sem esse suporte, informações críticas sobre o estado dos equipamentos ficam dispersas ou inacessíveis, comprometendo a segurança operacional e a eficiência das equipes de manutenção.

Diante desse cenário, o presente trabalho busca associar as disciplinas de engenharia elétrica e engenharia de controle e automação com o objetivo de desenvolver um sistema de gestão de ensaios para subestações móveis. Por meio do desenvolvimento de uma aplicação web integrada a um banco de dados relacional *PostgreSQL*, utilizando o *framework Django* com linguagem *Python*, o sistema permite o registro estruturado de ensaios de referência e de campo, a comparação automatizada entre esses valores com classificação de resultados em categorias de conformidade, e a geração de *dashboards* analíticos que consolidam o histórico de ensaios e evidenciam não conformidades que demandam atenção técnica, constituindo uma ferramenta de

suporte qualificado à tomada de decisão nas equipes de operação e manutenção.

1.1 Objetivos

1.1.1 *Objetivo geral*

Digitalizar e automatizar o processo de gestão de ensaios elétricos em subestações móveis por meio do desenvolvimento de uma aplicação *web* que integre armazenamento estruturado de dados, análise comparativa entre ensaios de fábrica e campo, e geração automatizada de visualizações analíticas.

1.1.2 *Objetivos específicos*

- Modelar e implementar um banco de dados relacional PostgreSQL para armazenamento estruturado de dados de subestações móveis, ensaios de referência e ensaios de campo;
- Desenvolver uma aplicação *web* utilizando *Django/Python* com funcionalidades de cadastro de SE móveis, cadastro de ensaios de fábrica, cadastro de ensaios de campo, consultas, análise comparativa automatizada entre ensaios de campo e fábrica e geração de *dashboards*;
- Testar o sistema desenvolvido por meio do cadastro de dados reais de subestações móveis e ensaios de referência da CEMIG, complementados por resultados de campo gerados para fins de validação, e apresentar os resultados obtidos.

1.2 Organização do Texto

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos. O capítulo 1 apresenta a introdução, contextualizando o problema da gestão de ensaios elétricos em subestações móveis, a justificativa e os objetivos do projeto. O capítulo 2 aborda a revisão bibliográfica, fundamentando os conceitos de subestações elétricas e seus principais equipamentos, subestações móveis, ensaios elétricos de comissionamento, banco de dados relacionais e o *framework Django*. O capítulo 3 descreve a metodologia, detalhando a modelagem e implementação do banco de dados PostgreSQL e o desenvolvimento da aplicação *web* com *Django*. O capítulo 4 expõe os resultados obtidos, apresentando as principais telas e funcionalidades do sistema desenvolvido. Por fim, o capítulo 5 apresenta as conclusões finais e as sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, é apresentada uma revisão bibliográfica com o objetivo de compreender o contexto no qual se insere a implementação do projeto. Para isso, são abordados conceitos relacionados ao sistema elétrico de potência, às subestações e aos ensaios de rotina realizados em subestações móveis. Adicionalmente, realiza-se uma revisão acerca de banco de dados e do *framework Django*, ferramentas fundamentais para o desenvolvimento do sistema proposto.

2.1 Subestações Elétricas

As Subestações de Energia Elétrica desempenham um papel importante no Sistema Elétrico de Potência (SEP), sendo essenciais para o bom desempenho e confiabilidade operacional do sistema, uma vez que permitem a adequação dos níveis de tensão desde a geração até os centros de consumo num ambiente onde são exigidos altos níveis de desempenho e segurança (MONTEIRO, 2023). A construção de novas subestações e a expansão de instalações existentes são projetos recorrentes nas concessionárias de energia elétrica.

Existem quatro tipos principais de subestações: pátios de manobra em estações geradoras, subestações de consumidores individuais, subestações de sistema (para transferência de blocos de potência) e subestações de distribuição. As subestações de distribuição são as instalações mais comuns em sistemas elétricos de potência, fornecendo os circuitos de distribuição que suprem diretamente a maioria dos clientes. Tipicamente localizadas próximas aos centros de carga, estas subestações situam-se em bairros ou nas proximidades das áreas que atendem, sendo as mais frequentemente encontradas pelos consumidores finais (MCDONALD, 2016).

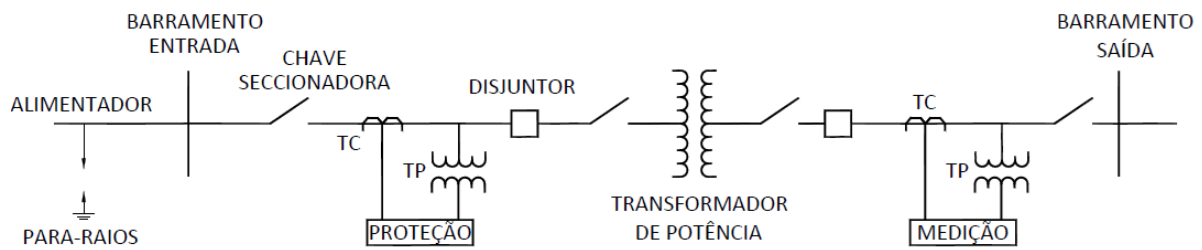
Conforme McDonald (2016), as subestações de distribuição classificam-se em seis categorias principais, apresentadas a seguir. Dentre estas classificações, as subestações móveis, objeto central deste trabalho, serão abordadas no próximo capítulo.

- Tipo externo com equipamentos isolados a ar;
- Tipo interno com equipamentos isolados a ar;
- Tipo externo com equipamentos isolados a gás;
- Tipo interno com equipamentos isolados a gás;
- Subestações de tecnologia mista;
- Subestações móveis.

2.1.1 Principais equipamentos de uma subestação

Uma subestação de energia elétrica constitui-se como um conjunto integrado de equipamentos e dispositivos essenciais para a operação, controle e proteção do sistema elétrico de potência. Os equipamentos podem ser classificados em distintas categorias funcionais: equipamentos de transformação, responsáveis pela adequação dos níveis de tensão; equipamentos de manobra, que permitem a operação e reconfiguração dos circuitos elétricos; equipamentos de proteção, destinados a salvaguardar o sistema contra condições anormais de operação; equipamentos de medição e controle; barramentos, que interligam os diversos componentes; e elementos auxiliares como isoladores, muflas e sistemas de comunicação (MCDONALD, 2016), (CARLETO, 2023). A seguir, apresenta-se um diagrama unifilar básico contemplando os equipamentos de uma subestação.

Figura 1 – Diagrama unifilar básico de uma subestação



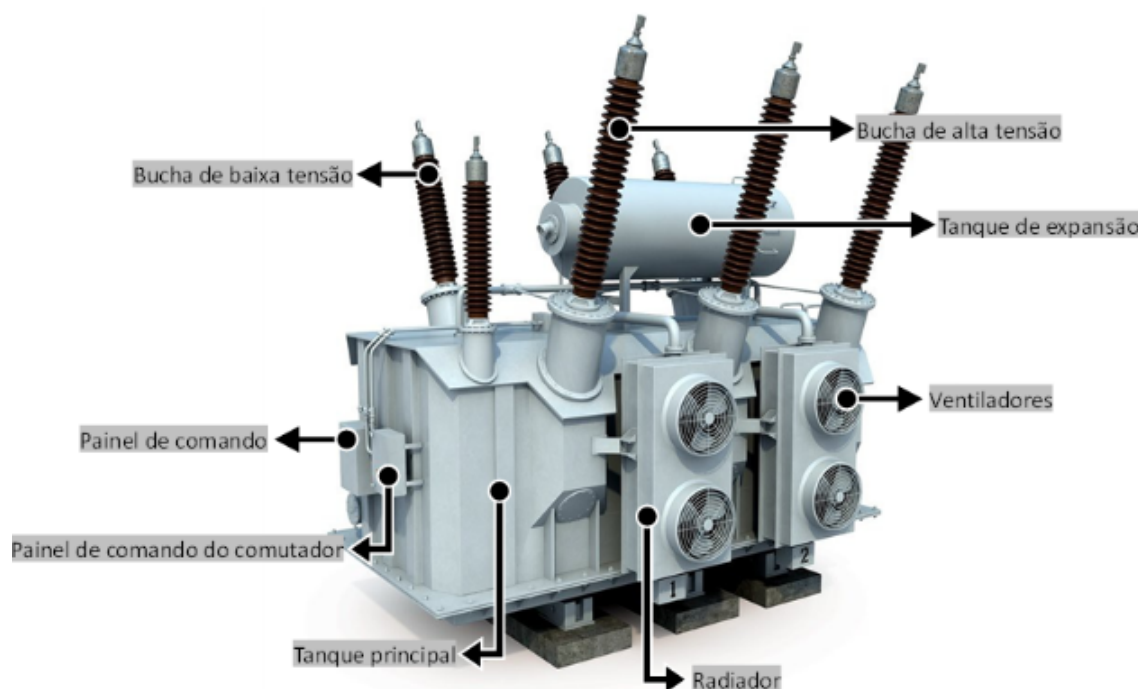
Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

2.1.1.1 Transformador de força

Transformadores ou autotransformadores de força, sejam trifásicos ou monofásicos, constituem equipamentos essenciais em subestações elétricas, operando em níveis de potência da ordem de MVA (MegaVolt-Ampere) e tensões superiores a 69 kV (CARLETO, 2023). Estes equipamentos são empregados no acoplamento à saída dos sistemas de geração, na interconexão entre redes de transmissão, em subestações de distribuição e em subestações de consumidores industriais, desempenhando a função primordial de adequar os níveis de tensão elétrica conforme as necessidades operacionais do sistema. A classificação dos transformadores de força baseia-se no meio isolante utilizado, que pode ser óleo mineral, líquidos isolantes sintéticos de baixa inflamabilidade, como o silicone, ou isolação a seco (MONTEIRO, 2023)

A estrutura construtiva destes transformadores compreende diversos componentes integrados, cada qual desempenhando funções específicas para garantir a operação segura e eficiente do equipamento. A Figura 2 ilustra os principais componentes de um transformador de força típico utilizado em subestações.

Figura 2 – Transformador de força



Fonte: (DIGITAIS, 2023)

2.1.1.2 Transformador de potencial

O transformador de potencial (TP) constitui um transformador para instrumentação cujo enrolamento primário é conectado em paralelo (derivação) ao circuito elétrico principal, enquanto seu enrolamento secundário destina-se à alimentação de instrumentos de medição, proteção e controle (MONTEIRO, 2023).

Segundo Monteiro (2023), as principais características dos transformadores de potencial compreendem: tensão primária nominal, estabelecida conforme a tensão do circuito de instalação; tensão secundária nominal, padronizada em 115 V ou $115/\sqrt{3}$ V; classe de exatidão de 0,3 para medidores e 0,6 para indicadores; e carga nominal, determinada pelos requisitos de exatidão do TP conforme a norma ANSI/IEEE C57.13.

A Figura 3 apresenta dois modelos de transformadores de potencial frequentemente utilizados em subestações de distribuição. O equipamento identificado pela letra A consiste em um TP de construção para instalação externa (tipo pedestal), projetado para operação em tensões de até 145 kV, caracterizando-se por sua estrutura isolada a óleo ou gás e montagem vertical. O equipamento identificado pela letra B corresponde a um TP de construção compacta, destinado a instalações internas (abrigadas), adequado para operação em tensões de até 15 kV, apresentando configuração com isoladores poliméricos ou de porcelana em disposição dupla no secundário.

Figura 3 – Tipos construtivos de TP: Alta tensão e média tensão

(a) TP alta tensão (145 kV)



Fonte: (ENERGY, 2026)

(b) TP média tensão (15 kV)



Fonte: (BRASFORMER, 2021)

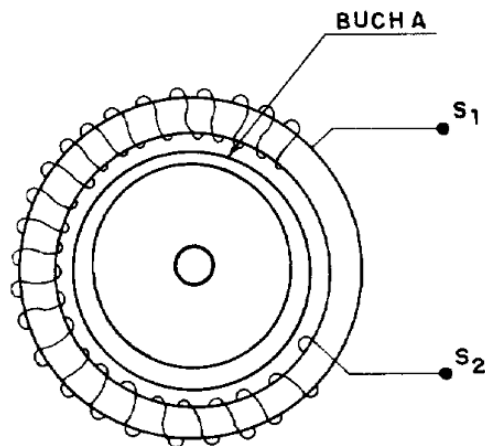
2.1.1.3 Transformador de corrente

O transformador de corrente (TC) constitui equipamento de instrumentação cujo enrolamento primário conecta-se em série ao circuito elétrico principal, enquanto o enrolamento secundário alimenta instrumentos de medição, proteção e controle. Esta configuração permite reduzir correntes elevadas do circuito primário a valores compatíveis com a instrumentação (MONTEIRO, 2023).

Quanto à construção mecânica, os transformadores de corrente classificam-se em cinco tipos principais: tipo primário enrolado, tipo barra, tipo janela, tipo bucha e TC com núcleo dividido. Cada configuração adequa-se a diferentes aplicações conforme características do sistema elétrico e requisitos de instalação (MONTEIRO, 2023).

Em subestações móveis, empregam-se predominantemente TCs tipo bucha, conforme ilustrado na Figura 4, projetados especificamente para instalação sobre buchas de equipamentos elétricos de potência, como transformadores e disjuntores. Esta concepção permite integração direta ao equipamento principal, eliminando necessidade de estruturas de suporte adicionais e otimizando utilização do espaço — aspecto crítico em instalações móveis.

Figura 4 – TC tipo bucha



Fonte: (Ensinando Elétrica, 2016)

2.1.1.4 Disjuntores

Disjuntores são dispositivos eletromecânicos fundamentais projetados para interromper correntes de defeito, especialmente curto-circuitos (SOUZA, 2015). Devem interromper correntes de falha no menor tempo possível para limitar degradação dos contatos e controlar duração da falta (GARZON, 1997), além de estabelecer, interromper e isolar correntes nominais ou inferiores.

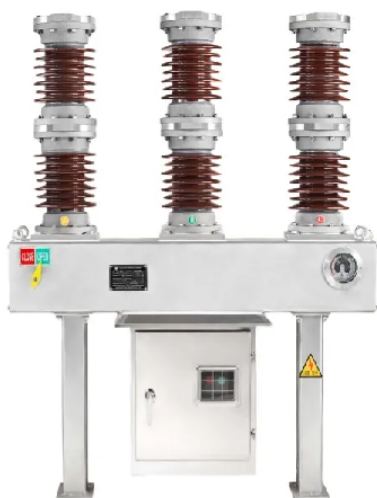
Na posição fechada, os contatos apresentam impedância muito baixa (ordem de *micro-ohms*); na posição aberta, impedância extremamente alta (idealmente infinita). A transição entre estados deve ocorrer com taxa adequada de variação de impedância, pois variações lentas envolvem energia térmica considerável, tornando o dispositivo maior e mais oneroso (FLURSCHEIM, 1982).

Categorizam-se conforme princípio de extinção de arcos: óleo, SF₆, vácuo ou ar comprimido. Subestações móveis utilizam comumente disjuntores a SF₆, gás isolante inerte e não inflamável com rigidez dielétrica 2,5 vezes maior que o ar (OLIVEIRA, 2015). A alta eletronegatividade do SF₆ dificulta ionização e formação de arcos, apresentando baixa necessidade de manutenção pois componentes da decomposição não são condutores (FILHO, 2013).

A seguir, a Figura 5 apresenta dois equipamentos de manobra: (a) disjuntor a SF₆ para média tensão (15 kV); (b) Módulo de Manobra Híbrido Compacto (MMHC), amplamente utilizado em subestações móveis. Os MMHCs integram disjuntor, chave seccionadora, lâmina de aterramento e, opcionalmente, transformadores de corrente de medição em unidade compacta. As vantagens incluem redução de espaço físico, simplificação de instalação e comissionamento, diminuição de conexões elétricas, menor necessidade de manutenção e maior confiabilidade operacional.

Figura 5 – Tipos de disjuntores

(a) Disjuntor 15 kV



Fonte: (GROUP, 2024)

(b) MMHC 145 kV



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

2.1.1.5 Chave seccionadora

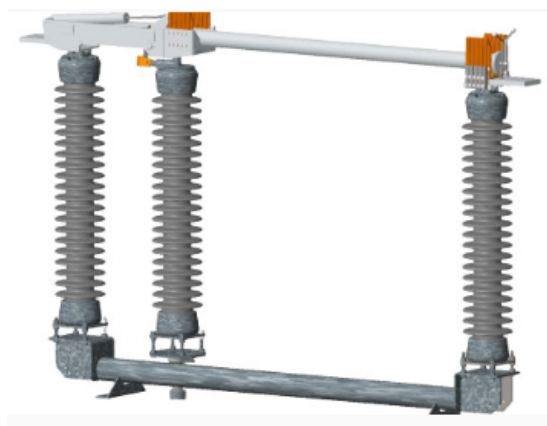
Chave seccionadora é dispositivo mecânico destinado à condução de corrente elétrica e à criação de ponto de abertura no circuito, permitindo isolamento de equipamentos como disjuntores, transformadores de potência, bancos de capacitores e reatores. Suas principais funções incluem: operar com confiabilidade nos comandos de abertura e fechamento, suportar continuamente correntes de carga sem aquecimento excessivo e manter-se fechada mesmo sob correntes de falta (MCDONALD, 2016).

Projetadas para conduzir permanentemente correntes normais de operação e suportar, por curtos intervalos, correntes elevadas de curto-circuito conforme limites especificados, geralmente em segundos ou ciclos conforme magnitude da corrente, as chaves seccionadoras aplicam-se tipicamente a manobras sem carga. Estas compreendem abertura ou fechamento de circuitos com correntes muito pequenas, tais como correntes capacitivas de carga de linha, correntes resistivas e indutivas de magnetização, ou situações sem diferença significativa de tensão entre terminais, como divisão de laço ou comutação paralela (MCDONALD, 2016).

As chaves com abertura vertical são o tipo de chave seccionadora mais amplamente utilizado e também o mais versátil, já que podem ser instaladas com espaçamento mínimo entre fases. As chaves de abertura dupla nas extremidades (*double end break*) também podem ser instaladas com espaçamento mínimo entre fases, o mesmo espaçamento utilizado para as chaves de abertura vertical, pois, na posição aberta, as lâminas ficam desconectadas tanto da fonte quanto da carga (MCDONALD, 2016). A Figura 6 apresenta essas duas opções de chaves.

Figura 6 – Tipos de seccionadoras: abertura vertical e dupla abertura lateral

(a) Abertura vertical



Fonte: (Maurizio, 2024)

(b) Dupla abertura lateral



Fonte: (Mesh Engenharia, 2022)

2.1.1.6 Para-raios

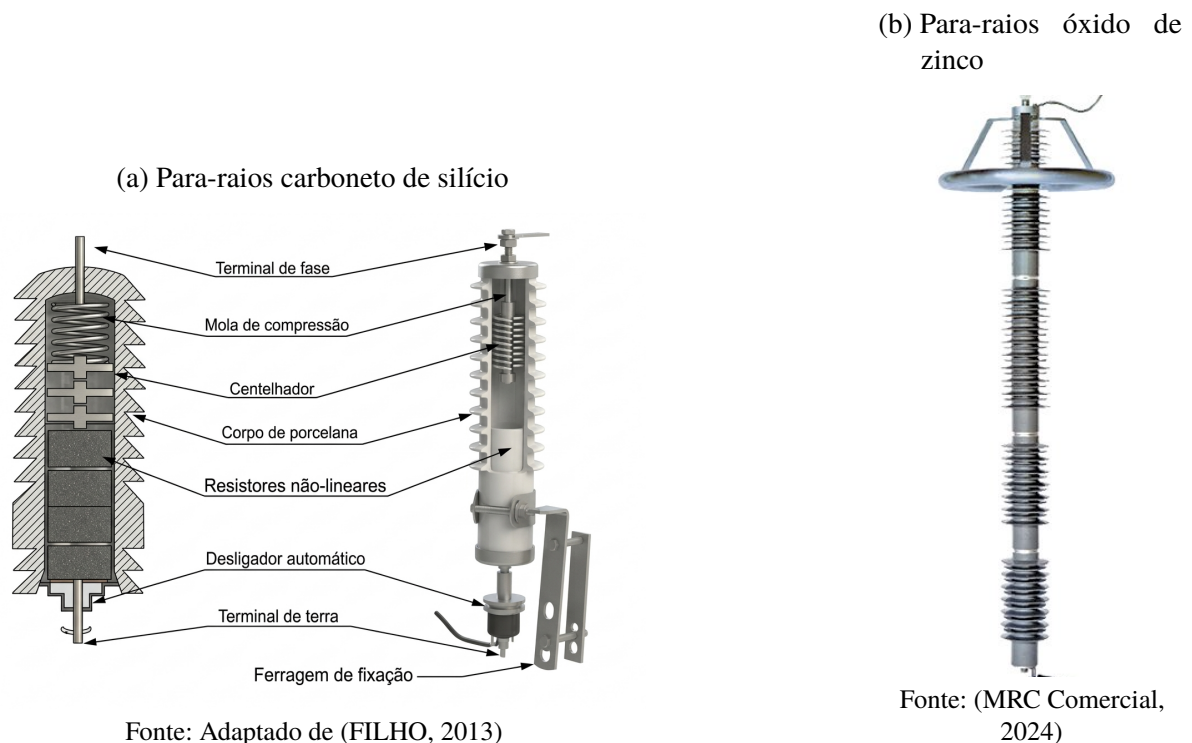
O para-raios é um dispositivo de proteção cuja função primordial consiste em limitar os valores de sobretensões transitórias que, caso não sejam adequadamente suprimidas, podem causar danos severos aos equipamentos elétricos de uma subestação. O princípio de operação fundamenta-se na capacidade do para-raios de alterar suas características elétricas em resposta a sobretensões: sob condições normais de operação, o dispositivo apresenta alta impedância, comportando-se como isolante; quando submetido a sobretensões que excedem seu nível de proteção, transiciona para um estado de baixa impedância, tornando-se condutor e drenando a corrente de surto para a terra, reduzindo assim o valor de crista da onda a níveis seguros determinados por suas características construtivas (MONTEIRO, 2023).

Após a descarga da corrente de surto para a terra, o para-raios deve restabelecer rapidamente sua condição isolante, interrompendo a corrente subsequente à frequência industrial que tende a circular através do dispositivo. Esta capacidade de restabelecimento define a tensão nominal do para-raios, caracterizada como a máxima tensão à frequência nominal do sistema sob a qual o dispositivo permanece capaz de interromper a corrente subsequente imediatamente após ter drenado a corrente associada a um surto de tensão. A tensão disruptiva à frequência industrial, por sua vez, representa a máxima tensão em frequência nominal que o para-raios pode suportar continuamente sem que se processe a descarga através de seus elementos, estabelecendo assim o limite operacional do dispositivo sob condições de regime permanente (MONTEIRO, 2023).

Os para-raios classificam-se conforme elemento resistivo não linear: carboneto de silício (SiC), com blocos associados a centelhadores série e componentes estruturais em porcelana; e óxido de zinco (ZnO), sem centelhadores, com elevado coeficiente de não linearidade e invólucros de porcelana ou poliméricos. Os invólucros poliméricos oferecem maior segurança ao eliminar risco de explosão. Devido à operação continuamente energizada, para-raios ZnO podem incorporar contadores de descarga e indicadores de falta (FILHO, 2013). A Figura 7 apresenta os

dois tipos de para-raios.

Figura 7 – Para-raios



2.1.1.7 Sistema de automação e comunicação em subestação

A automação de subestações permite monitoramento, controle e proteção remota e integrada dos equipamentos, reduzindo intervenção humana presencial e aumentando a confiabilidade do sistema. Os Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IEDs), relés de proteção digitais, controladores lógicos programáveis (CLPs) e medidores, constituem o elemento central dos sistemas modernos, concentrando em único equipamento funções antes desempenhadas por dispositivos eletromecânicos individuais. Complementam a infraestrutura as Unidades de Terminal Remoto (RTUs), que coletam sinais digitais e analógicos do campo e os transmitem ao sistema SCADA, os concentradores de dados, que agregam informações de múltiplos IEDs, e os *gateways* de subestação, que gerenciam o tráfego entre ambiente interno e sistemas externos (MCDONALD, 2016).

A comunicação padronizada entre dispositivos de diferentes fabricantes é viabilizada por protocolos como o IEC 61850 — padrão internacional predominante em subestações modernas —, DNP3 e *Modbus*, utilizados especialmente em instalações antigas ou interfaces com sistemas legados. A infraestrutura física migrou progressivamente para redes em fibra óptica, oferecendo maior imunidade a interferências eletromagnéticas e maior largura de banda.

O operador interage com o sistema via Interface Homem-Máquina (IHM), que apresenta diagrama unifilar com estado em tempo real dos equipamentos, grandezas elétricas, alarmes e

registros de eventos, permitindo supervisão local ou remota de múltiplas subestações simultaneamente. Este sistema integrado confere capacidade de operação autônoma, registro histórico para análise de desempenho e rastreabilidade de eventos, características fundamentais para confiabilidade e segurança dos sistemas elétricos contemporâneos. A Figura 8 ilustra o COD, Centro de Operação da Distribuição da CEMIG.

Figura 8 – Centro de Operação da Distribuição CEMIG



Fonte: (CEMIG, 2024)

2.2 Subestações Móveis

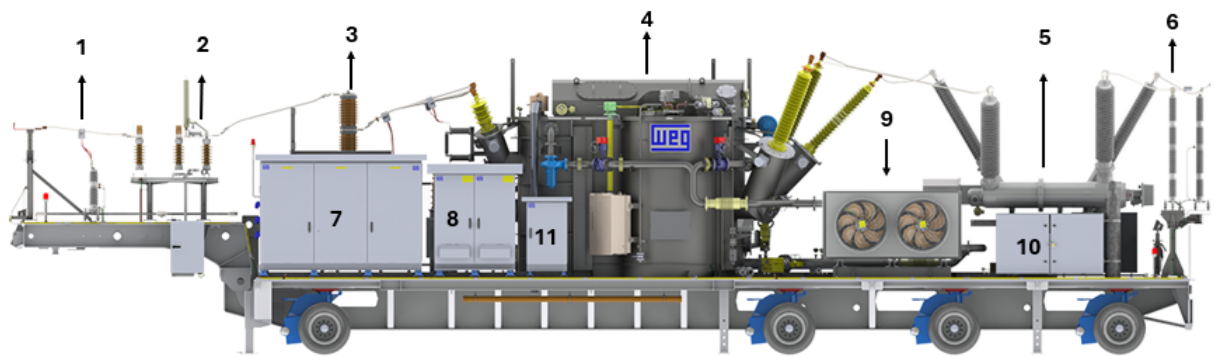
As subestações móveis desempenham um papel estratégico no sistema elétrico brasileiro, atuando como soluções temporárias ou emergenciais para garantir a continuidade do fornecimento de energia durante manutenções programadas, ampliações de rede, eventos especiais ou situações de contingência (LOPEZ-ROLDAN *et al.*, 2006; BISEN; SINGH, 2016). Estas unidades são completamente equipadas com transformador, equipamentos de alta e média tensão, sistemas de proteção, medição e controle, montadas sobre semi-reboques, permitindo rápida integração em diferentes pontos da rede elétrica (LOPEZ-ROLDAN *et al.*, 2006).

Diferentemente das subestações fixas, as subestações móveis são projetadas para serem transportadas e instaladas rapidamente em diferentes localidades, o que exige especial atenção à sua integridade física e funcional após cada deslocamento. A operação satisfatória de uma subestação móvel depende da sobrevivência ao processo repetitivo de transporte, montagem e desmontagem de diversos tipos de equipamentos. Não apenas os equipamentos individuais devem ser adequadamente projetados, mas também suas ancoragens, serviços e interconexões devem

ser bem dimensionados para suportar cargas estáticas e dinâmicas decorrentes do transporte (LOPEZ-ROLDAN *et al.*, 2006).

A Figura 9 apresenta uma subestação móvel do fabricante WEG, cujos principais componentes são descritos a seguir:

Figura 9 – Subestação móvel



Fonte: Adaptado de (WEG, 2026)

1. Para-raios de média tensão.
2. Chave seccionadora.
3. Equipamento de manobra de média tensão. A Figura 9 ilustra um disjuntor de média tensão. Em outras configurações de subestações móveis, pode-se empregar apenas um equipamento de manobra de média tensão, sendo este o próprio disjuntor, religadores ou chave seccionadora.
4. Transformador de força.
5. Equipamento de manobra de alta tensão. No exemplo apresentado, observa-se um MMHC (Módulo de Manobra Híbrido Compacto), constituído por compartimento único isolado a gás SF₆, integrando disjuntor e chaves seccionadoras de entrada e saída.
6. Para-raios de alta tensão.
7. Painéis de serviços auxiliares, comandos locais e painel de comunicação.
8. Painel do retificador e banco de baterias.
9. Aerotermos. Os transformadores de subestações móveis caracterizam-se pelo sistema de refrigeração ODAF (óleo direcionado e ar forçado), que permite redução de dimensões viabilizando a instalação em semirreboque. Assim, as subestações móveis dispõem de bombas de óleo e aerotermos para operação deste sistema.

10. Caixas de acondicionamento de documentos técnicos, equipamentos de comunicação, kit gás SF₆, entre outros.
11. Paineis do transformador.
12. Além desses principais itens elencados, outro importante equipamento que não é possível de ser visualizado na figura é o transformador de serviços auxiliares, responsável pela alimentação de todas as cargas em corrente alternada e do retificador.

2.3 Ensaios em Subestações Móveis

É fundamental assegurar a integridade da subestação móvel previamente ao comissionamento e energização, visto que o equipamento pode percorrer distâncias superiores a 1000 km — por exemplo, entre subestações no sul e norte de Minas Gerais. Durante a instalação, realizam-se ensaios elétricos para verificação de integridade física e funcional, cujos procedimentos variam conforme práticas da concessionária, especificações do fabricante e aspectos contratuais. A seguir, apresentam-se ensaios aplicados pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG).

2.3.1 Resistência de isolamento

O ensaio de resistência de isolamento é aplicado a transformadores de força, transformadores de serviços auxiliares, transformadores de potencial e cabos com terminações muflas, utilizando as normas NBR 5356 e NBR 5380 como referência. Este ensaio tem por objetivo quantificar a resistência oferecida pelos materiais isolantes à passagem de corrente elétrica. A resistência de isolamento tem seu valor influenciado por diversos fatores, como a umidade, contaminação superficial, alterações da capacitância do sistema isolante, perdas superficiais e temperatura do material, constituindo-se em indicador eficaz da deterioração dos equipamentos elétricos decorrente dessas condições adversas (PAULINO, 2014).

Deve-se observar, entretanto, que este ensaio não constitui critério definitivo para aprovação ou rejeição do equipamento. Pelas suas características, é particularmente eficaz na detecção de curtos-circuitos francos e defeitos grosseiros no sistema isolante. A identificação de defeitos menos pronunciados ou incipientes demanda ensaios dielétricos complementares, tensão aplicada e tensão induzida em corrente alternada, executados pelo fabricante durante os ensaios de fábrica anteriores à entrega do equipamento (PAULINO, 2014).

Para execução deste ensaio, utiliza-se o equipamento megômetro apresentado na Figura 10, capaz de aplicar tensão em corrente contínua com valores entre 500 V e 10.000 V. A Tabela 1 estabelece as tensões de ensaio recomendadas conforme a tensão nominal do equipamento. O tempo de aplicação da tensão de ensaio é de geralmente um minuto.

Tabela 1 – Tensões de ensaio conforme tensão nominal do equipamento

Tensão do equipamento (V)	Tensão de teste (V)
< 1.000	500
1.000 a 2.500	500 a 1.000
2.501 a 5.000	1.000 a 2.500
5.001 a 12.000	2.500 a 5.000
> 12.000	10.000

Fonte: Adaptado de (PAULINO, 2014)

No ensaio em questão, três componentes de corrente são identificados. A **corrente de deslocamento (I_C)**, de natureza capacitiva, surge no instante inicial da energização devido ao efeito capacitivo entre condutores, atingindo valor máximo na energização e decrescendo rapidamente após o carregamento completo do sistema isolante. A **corrente de absorção (I_A)**, responsável pela polarização dos dipolos elétricos do dielétrico, decresce vagarosamente em intervalo variável entre dez minutos e várias horas, sendo particularmente prolongada em equipamentos de alta capacitância ou isolamento contaminada e úmida. A **corrente de fuga (I_L)**, componente mais importante para avaliação do isolamento, flui pela superfície e interior do dielétrico, apresenta caráter irreversível, não varia com o tempo de aplicação de tensão, e sua elevação indica deterioração iminente do sistema isolante (PAULINO, 2014).

Figura 10 – Megômetro

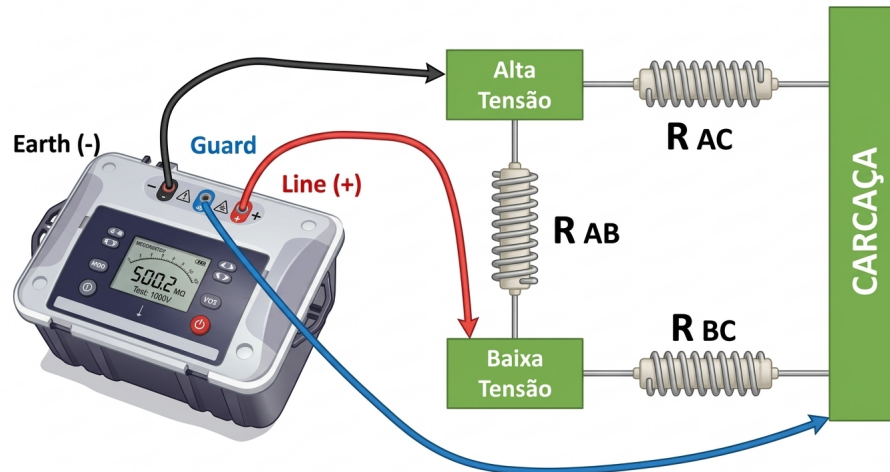


Fonte: (Meastech, 2018)

A Figura 11 apresenta um exemplo de configuração para execução do ensaio de resistência de isolamento em transformador de dois enrolamentos. Nesta montagem, objetiva-se avaliar a integridade do isolamento entre o enrolamento de alta tensão e o enrolamento de baixa tensão. Para tal, conecta-se o terminal "*Line*" do megômetro ao enrolamento de baixa tensão, o terminal "*Earth*" ao enrolamento de alta tensão, e o terminal "*Guard*" à carcaça do equipamento, esta

última conexão tendo por finalidade eliminar correntes de fuga superficiais que poderiam interferir na medição.

Figura 11 – Exemplo de um ensaio de resistência de isolamento



Fonte: Adaptado de (PAULINO, 2014)

2.3.2 Tensão aplicada em cabos isolados

O ensaio de tensão aplicada é um dos principais métodos para validação de cabos isolados de média tensão e suas terminações (muflas), tendo como objetivo evitar que cabos com isolamento em más condições entrem em operação. O método é executado conforme o critério tensão $\times$ tempo ($U \times t$), seguindo normas que estabelecem os limites de tensão e a duração do ensaio para cada tipo de cabo. A tensão aplicada é geralmente superior à de operação, buscando garantir robustez e confiabilidade do sistema, reduzindo riscos de falhas inesperadas durante a operação (GONCALVES, 2024).

Dois métodos principais são empregados para ensaios em cabos isolados: tensão aplicada em corrente contínua (HiPot DC) e ensaio VLF (*Very Low Frequency*) em corrente alternada com frequência reduzida. O ensaio DC, amplamente utilizado em cabos com isolação de papel impregnado a óleo até os anos 1980, mostrou-se inadequado para cabos com isolação polimérica (XLPE e HMWPE), causando degradação tanto em instalações novas quanto existentes. Cargas espaciais acumulam-se no dielétrico durante o ensaio DC, podendo permanecer por até 24 horas após o teste. Com a energização dos cabos, a superposição entre a tensão operacional e as cargas residuais ocasiona sobretensões localizadas que induzem arborescamento elétrico (*electrical treeing*), fenômeno de pré-ruptura que compromete a integridade do isolamento (GONCALVES, 2024).

O ensaio VLF caracteriza-se pela aplicação de tensão em corrente alternada com frequências inferiores a 1 Hz, sendo comumente empregadas frequências entre 0,01 Hz e 0,1 Hz para minimizar o estresse dielétrico no sistema isolante. A principal vantagem deste método em

relação aos ensaios convencionais em corrente contínua reside na redução significativa do risco de degradação do isolamento polimérico, proporcionando avaliação mais confiável das condições operacionais do cabo. O ensaio consiste na aplicação de tensão alternada de frequência muito baixa, durante a qual são monitorados parâmetros como corrente de fuga, tangente delta (fator de dissipação) e capacitância, permitindo identificar defeitos incipientes e avaliar a integridade do sistema isolante (MEDEIROS, 2025).

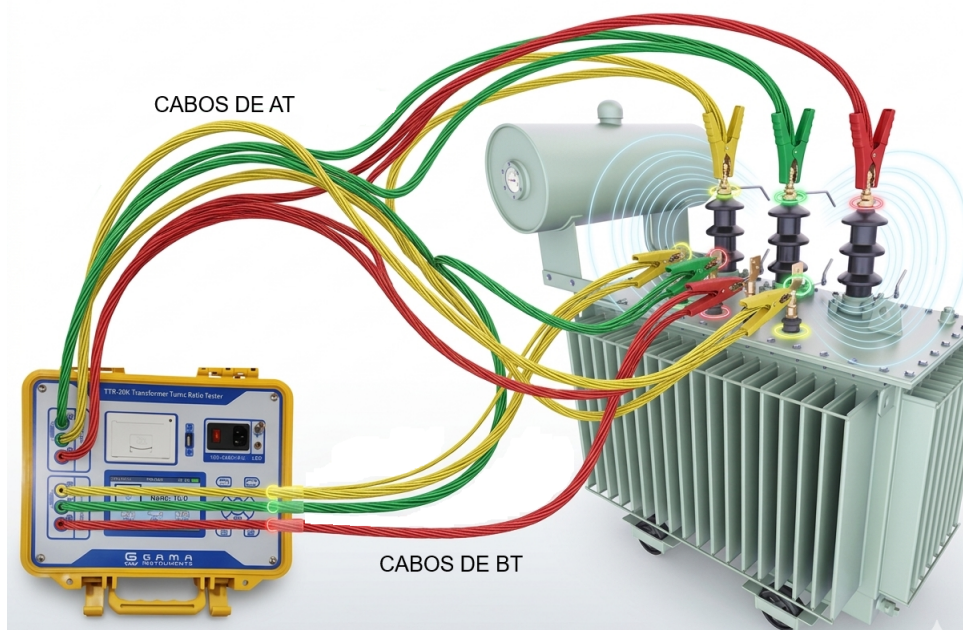
2.3.3 Relação de transformação

O ensaio de relação de transformação é executado nos transformadores de força, transformadores de serviços auxiliares e transformadores de potencial. O objetivo consiste em determinar a relação entre as tensões primária e secundária (V_1/V_2), verificando o desvio percentual entre a relação nominal e a medida, que deve estar compreendido na faixa de $\pm 0,5\%$ para resultados satisfatórios.

O ensaio deve ser realizado aplicando-se a um dos enrolamentos tensão igual ou inferior à nominal, com frequência igual ou superior à nominal. Para transformadores trifásicos com enrolamentos independentes e terminais acessíveis, o ensaio pode ser executado utilizando-se alimentação monofásica ou trifásica, conforme mais conveniente. Caso o enrolamento onde a tensão é aplicada esteja ligado em estrela com neutro acessível, emprega-se alimentação trifásica, procedendo-se analogamente ao ensaio em transformadores monofásicos (ABNT, 2007).

Para a realização desse ensaio, geralmente emprega-se o equipamento TTR (*Transformer Turns Ratio*), cujo princípio de operação consiste na aplicação de um sinal de tensão alternada de baixa amplitude no enrolamento de alta tensão do transformador e na medição precisa da tensão induzida no enrolamento de baixa tensão. A Figura 12 ilustra uma configuração típica de ensaio em um transformador trifásico, na qual o equipamento é conectado às buchas do transformador, previamente desenergizado, por meio de dois conjuntos de cabos tricolores, destinados respectivamente aos terminais de alta e de baixa tensão. Essa ligação trifásica simultânea possibilita ao instrumento calcular automaticamente a relação de transformação (V_1/V_2) para cada fase, comparar o resultado obtido com o valor nominal indicado na placa de identificação do equipamento e apresentar o desvio percentual correspondente.

Figura 12 – Exemplo de um ensaio de relação de transformação



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

2.3.4 Resistência de contato em equipamentos de manobra

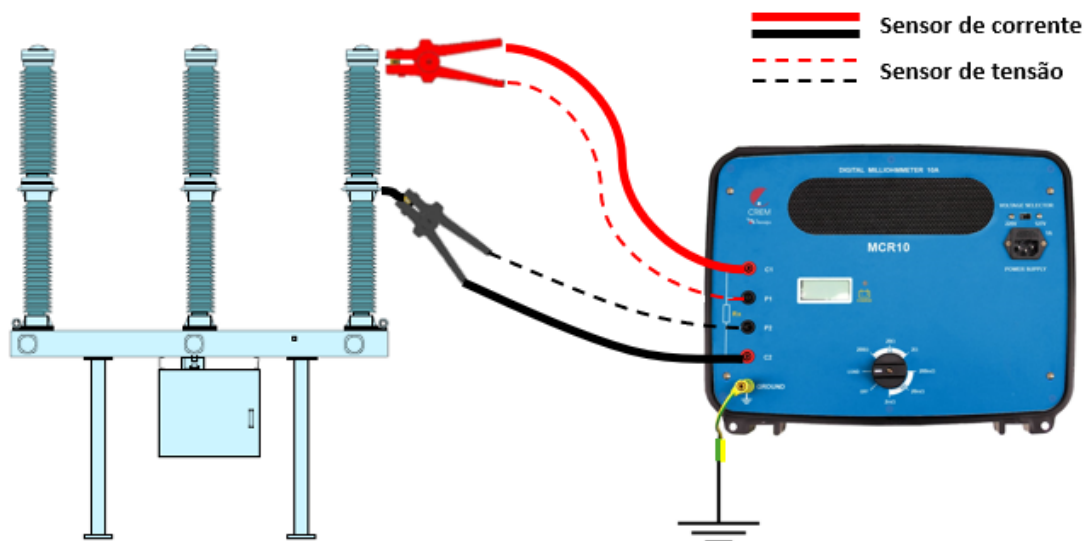
O principal fator que contribui para a degradação dos contatos de um disjuntor é a formação de arcos elétricos (PANCU ADRIAN BARABOI, 2009). O desgaste dos contatos resulta em aumento da resistência elétrica entre eles, razão pela qual as principais técnicas de diagnóstico baseiam-se na medição de resistência. O objetivo do ensaio de resistência ôhmica dos contatos consiste em determinar a resistência entre cada um dos polos superiores e inferiores de um disjuntor quando este estiver na posição fechada, normalmente expressa em micro ou miliohms.

Atualmente, a medição de resistência estática de contato (MRE) constitui procedimento padrão empregado pelas concessionárias de energia para avaliação do estado dos contatos de disjuntores. O ensaio de MRE é executado mediante injeção de corrente contínua, com intensidade entre 50 A e 200 A conforme estabelecido pelas normas IEC 62271-100 e IEEE C37.09, através dos contatos principais do disjuntor, e medição da queda de tensão correspondente. Geralmente, emprega-se equipamento microhmímetro para execução do ensaio, sendo a resistência de contato calculada mediante aplicação direta da Lei de Ohm ($R = V/I$). A utilização de fonte de corrente contínua justifica-se pela necessidade de eliminar erros de medição decorrentes de eventuais componentes indutivos presentes no circuito sob ensaio (SOUZA, 2015).

Na realização do ensaio de resistência de contato, recomenda-se a adoção de alta corrente, com o objetivo de mitigar os efeitos de películas isolantes na superfície dos contatos, que promovem o aumento da resistência de contato. A aplicação de alta corrente proporciona o

aquecimento do polo, minimizando assim os efeitos dessas películas isolantes (SOUZA, 2015). Para a tomada de decisão sobre a substituição dos contatos, os valores de resistência medidos devem ser comparados com os valores limite recomendados pelos fabricantes, com os valores das outras fases do disjuntor em teste ou com os valores de disjuntores similares.

Figura 13 – Ensaio de resistência dos contatos de um disjuntor



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

2.3.5 Oscilografia em equipamentos de manobra

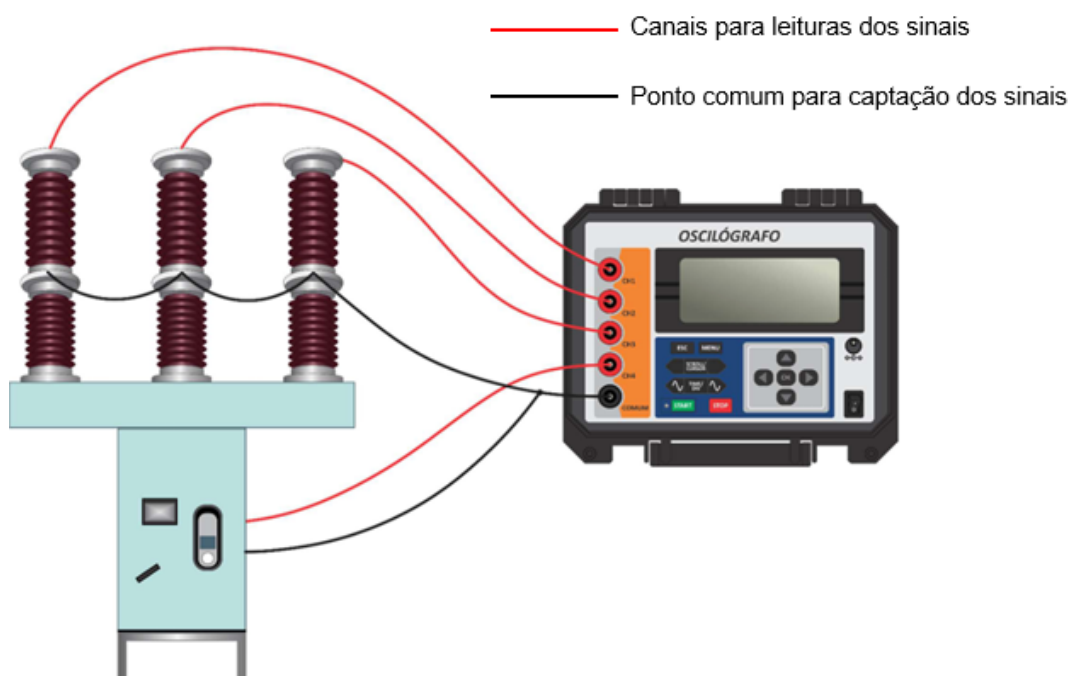
O ensaio de oscilografia avalia a simultaneidade na abertura e no fechamento dos polos do disjuntor durante sua operação, além de detectar possíveis irregularidades em seu funcionamento. A atuação simultânea na abertura dos polos é fundamental para garantir a rápida extinção do arco elétrico gerado no processo de interrupção. A ausência dessa simultaneidade pode provocar desgaste prematuro da capacidade de interrupção, reduzir a vida útil operacional do equipamento e, em casos mais severos, ocasionar a explosão e a perda total do disjuntor. De forma análoga, no fechamento, a falta de sincronismo entre os polos resulta em desgaste antecipado dos contatos, restringindo a quantidade de manobras que o equipamento pode suportar ao longo do tempo.

Para a realização do ensaio, emprega-se um oscilógrafo, essencialmente um osciloscópio com características específicas para uso em campo, desenvolvido para registrar com elevada precisão os eventos de comutação. O equipamento opera com base no princípio do divisor de tensão, permitindo acompanhar as transições entre os estados aberto-fechado e fechado-aberto dos polos do disjuntor. Como o ensaio envolve a medição nos três polos e na bobina de abertura ou de fechamento, a fim de determinar os tempos de operação, são necessários quatro canais de entrada para aquisição dos sinais pelo oscilógrafo (CIARLINI, 2022). A Figura 14 ilustra a configuração típica de montagem desse ensaio.

Os tempos medidos nas operações de abertura e de fechamento correspondem ao intervalo que cada polo leva para executar a manobra a partir do instante de energização da respectiva bobina. A partir dessas medições, obtêm-se, entre outros, os seguintes parâmetros:

1. Tempo de abertura/fechamento – tempo decorrido desde o acionamento da bobina até o início de abertura/fechamento do primeiro polo;
2. Discordância máxima entre polos – tempo calculado a partir da diferença entre o tempo de operação do polo mais rápido e o polo mais lento.

Figura 14 – Ensaio de oscilografia de um disjuntor



Fonte: Adaptado de (CIARLINI, 2022)

Como critérios para avaliação do desempenho operacional de um disjuntor, consideram-se três aspectos distintos: o tempo de abertura do polo mais rápido, o tempo de fechamento do polo mais rápido e a discordância de tempo entre o polo mais rápido e o mais lento. Para essa análise, é indispensável consultar os dados de placa, a ficha técnica ou o manual do fabricante, nos quais são especificadas as faixas admissíveis de tempo de abertura e de fechamento, visto que o equipamento também não deve operar em velocidade superior à recomendada.

Adicionalmente, deve-se observar o valor correspondente ao meio período da rede elétrica. Para sistemas operando em 60 Hz (período de 16,67 ms), a discordância entre os tempos de operação dos polos não pode ultrapassar meio período, equivalente a 8,33 ms.

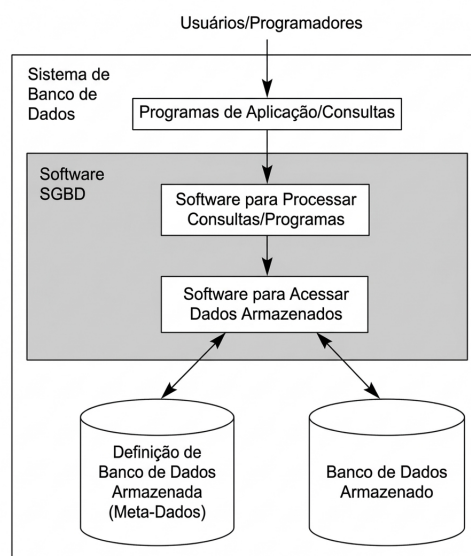
2.4 Banco de Dados

Um banco de dados (BD) é uma coleção organizada de dados relacionados que representa algum aspecto do mundo real, possui coerência lógica e é projetado para um propósito específico (ELMASRI; NAVATHE, 2017). Por exemplo, um sistema de gerenciamento de contatos em dispositivos móveis armazena nomes, telefones e endereços de forma estruturada, permitindo consultas e atualizações. Em contexto industrial, bancos de dados podem armazenar registros históricos de ensaios elétricos, dados operacionais de equipamentos ou informações de manutenção — aplicações que demandam organização robusta e confiável das informações.

Um Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados (SGBD) é um software de propósito geral que facilita os processos de definir, construir, manipular e compartilhar bancos de dados entre múltiplos usuários e aplicações. A **definição** de um banco de dados envolve especificar tipos de dados, estruturas e restrições a serem armazenadas, informações estas mantidas pelo SGBD em um catálogo denominado meta-dados. A **construção** corresponde ao processo de armazenamento físico dos dados em meio controlado pelo SGBD. A **manipulação** engloba funções como consulta, atualização e geração de relatórios (ELMASRI; NAVATHE, 2017).

Programas de aplicação acessam o banco de dados mediante consultas ou transações enviadas ao SGBD. Uma consulta seleciona dados para recuperação, enquanto uma transação pode resultar em alterações nos dados armazenados. O conjunto formado pelo banco de dados e seu sistema gerenciador constitui o **sistema de banco de dados** (ELMASRI; NAVATHE, 2017). A Figura 15 ilustra ambiente simplificado de um sistema de banco de dados, apresentando a interação entre usuários, aplicações, SGBD e os dados propriamente ditos.

Figura 15 – Ambiente simplificado de um banco de dados



Fonte: Adaptado de (ELMASRI; NAVATHE, 2017)

2.4.1 Modelo relacional

O modelo relacional foi proposto por Edgar Codd em 1970 como paradigma inovador para representação de dados. Em seu trabalho seminal, Codd demonstrou que a visão relacional permite descrever dados de maneira natural, eliminando a necessidade de estruturas adicionais e proporcionando maior independência entre dados e programas. Adicionalmente, estabeleceu fundamentos para tratamento de problemas como redundância e inconsistência. Este modelo, por suas características e completude teórica, demonstrou superioridade em relação aos modelos predominantes à época — o modelo de redes e o hierárquico. A principal vantagem do modelo relacional sobre seus predecessores reside na simplicidade de representação dos dados e na facilidade de expressão de consultas complexas (MACÁRIO; BALDO, 2005)

No modelo relacional, a construção fundamental para representação de dados é a **relação**, estrutura tabular composta por linhas não ordenadas e colunas. Uma relação é constituída por esquema e instância. O **esquema** especifica o nome da relação, os nomes dos atributos (ou campos) e seus respectivos domínios. O domínio de um atributo restringe o conjunto de valores admissíveis para esse atributo. O esquema de uma relação permanece invariável ao longo do tempo, sendo modificado apenas mediante comandos específicos de alteração de estrutura (ELMASRI; NAVATHE, 2017). Como exemplo, considere o esquema: Operador (Matrícula: *integer*, Nome: *character*, Função: *character*), onde:

- Operador é o nome da relação;
- Matrícula, nome e função são os atributos (ou campos) da relação;
- *integer* e *character* são os domínios dos respectivos atributos.

A **instância** de uma relação corresponde ao conjunto de linhas, também denominadas tuplas ou registros, mutuamente distintas, que compõem a relação em determinado momento. Diferentemente do esquema, a instância é dinâmica, uma vez que tanto o número de tuplas quanto o conteúdo de seus atributos podem variar temporalmente mediante operações de inserção, atualização ou remoção. Cada instância deve conformar-se rigorosamente ao esquema correspondente, respeitando o número de atributos definidos e seus respectivos domínios. A Tabela 2 apresenta exemplo de instância para o esquema Operador anteriormente definido.

Tabela 2 – Instância da relação Operador

Matrícula	Nome	Função
51465	Operador 1	Técnico de campo
58418	Operador 2	Técnico de campo
59527	Operador 3	Técnico de campo

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

Um banco de dados relacional constitui conjunto de uma ou mais relações com nomes distintos. O esquema do banco de dados relacional é a coleção dos esquemas de cada relação componente.

2.4.1.1 Chaves

Uma chave consiste em um ou mais atributos de uma relação cujos valores são utilizados para identificar de forma exclusiva cada tupla (ou registro). As chaves desempenham papel fundamental no modelo relacional, pois garantem a identificação dos registros e permitem estabelecer relacionamentos entre diferentes relações (REIS, 2017).

A chave primária (*Primary Key* – PK) identifica de forma exclusiva cada registro de uma relação, não sendo permitidos valores repetidos nem valores nulos. Normalmente, a chave primária corresponde a um atributo identificador, como a matrícula de um operador ou o número de série de um equipamento.

A chave estrangeira (*Foreign Key* – FK) consiste em um atributo cujo valor referencia a chave primária de outra relação. Dessa forma, torna-se possível estabelecer associações entre tabelas distintas, preservando a consistência das informações armazenadas. Por exemplo, uma relação de ensaios pode possuir um atributo correspondente à matrícula do operador responsável, referenciando a chave primária da relação Operador.

2.4.1.2 Restrições de Integridade

Os conceitos de integridade no modelo relacional são essenciais para assegurar confiabilidade e consistência dos dados armazenados. As restrições de integridade consistem em condições especificadas no esquema do banco de dados que limitam valores e relações admissíveis entre dados, garantindo manutenção exclusiva de informações válidas. Tais restrições devem ser satisfeitas por qualquer instância do banco, sendo verificadas automaticamente pelo SGBD em todas as operações de inserção, atualização ou exclusão (ELMASRI; NAVATHE, 2017).

Entre os principais tipos de restrições, destacam-se:

- **Restrições de domínio:** delimitam valores possíveis de atributos, especificando tipos de dados (numéricos, caracteres, data e hora) e intervalos válidos.
- **Restrições de chave:** asseguram a unicidade dos registros por meio das chaves candidatas e da chave primária, garantindo que cada tupla possa ser identificada de forma inequívoca.
- **Restrições de chave estrangeira (integridade referencial):** asseguram que os valores das chaves estrangeiras correspondam a valores existentes nas respectivas chaves primárias, preservando a consistência dos relacionamentos entre as relações.

- **Restrições de não nulidade:** especificam se um atributo é obrigatório (*NOT NULL*) ou opcional. Atributos de chave primária, por exemplo, sempre devem conter valores.

2.4.2 Modelo Entidade-Relacionamento

O Modelo Entidade-Relacionamento (MER) é um modelo conceitual de alto nível amplamente empregado no projeto de aplicações de banco de dados (ELMASRI; NAVATHE, 2017). Tem como objetivo descrever os dados do mundo real por meio de entidades, atributos e relacionamentos.

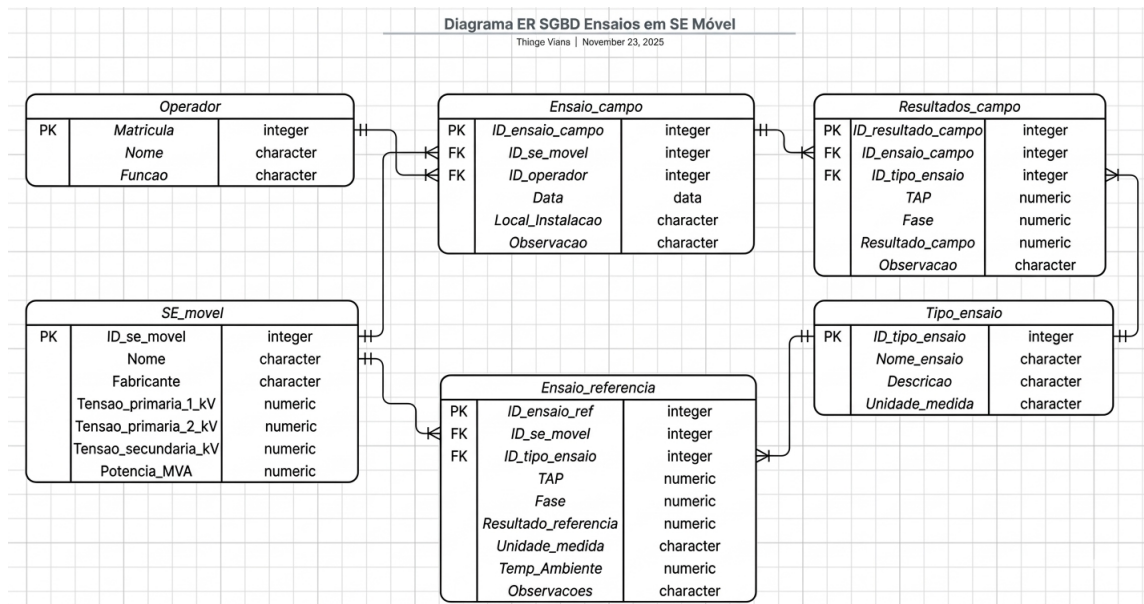
- **Entidade:** representa um objeto ou conceito do mundo real sobre o qual se deseja armazenar informações. Por exemplo, **Operador** e **Subestação Móvel** são entidades.
- **Atributo:** característica ou propriedade de uma entidade. Por exemplo, a entidade **Operador** pode possuir os atributos matrícula, nome e função.
- **Relacionamento:** vínculo entre duas ou mais entidades, geralmente expresso por um verbo. Por exemplo, “um operador **executa** um ensaio de campo” ou “uma SE móvel **possui** ensaio de referência”.

Relacionamentos são estruturas que indicam vínculos entre elementos de uma ou mais entidades (REIS, 2017), sendo geralmente caracterizados por verbos que expressam a natureza da associação. Na implementação do modelo relacional, os dados das diferentes entidades são armazenados em tabelas distintas, sendo frequentemente necessário combinar essas tabelas para responder às consultas realizadas pelos usuários. Os relacionamentos definidos no Modelo Entidade-Relacionamento são implementados no modelo relacional por meio de chaves primárias e chaves estrangeiras, que estabelecem as associações entre as diferentes relações do banco de dados.

2.4.2.1 Diagrama Entidade-Relacionamento

O MER, enquanto modelo conceitual, necessita de uma representação gráfica que permita visualizar de forma clara e padronizada as entidades, atributos e relacionamentos modelados. O Diagrama Entidade-Relacionamento (DER) cumpre esse papel, traduzindo o modelo conceitual em uma notação visual que facilita tanto a validação do projeto junto aos usuários quanto a posterior implementação no banco de dados relacional. A Figura 16 apresenta o DER desenvolvido para este trabalho. Embora o capítulo de Metodologia apresente uma contextualização mais detalhada do referido diagrama, nota-se que por meio dele é possível identificar as entidades, os atributos, seus respectivos domínios e os relacionamentos entre as entidades.

Figura 16 – Diagrama Entidade-Relacionamento

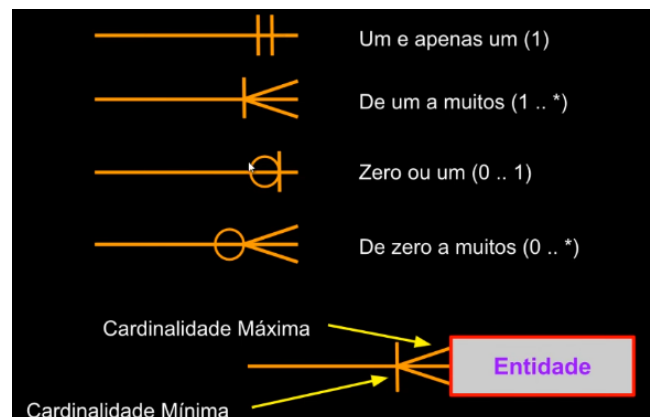


Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

Outro conceito fundamental que deve ser considerado na definição dos relacionamentos e na construção do DER refere-se às cardinalidades. A cardinalidade diz respeito ao número de itens (instâncias) que se relacionam nas entidades, definindo quantidades mínimas e máximas de participação no relacionamento (REIS, 2017). Para representação das cardinalidades no DER da Figura 16, adotou-se a notação Pé de Galinha.

A Figura 17 apresenta a simbologia da notação adotada. O símbolo posicionado à esquerda representa a cardinalidade mínima, enquanto o símbolo à direita indica a cardinalidade máxima. Adicionalmente, a figura ilustra como identificar relacionamentos com nenhuma, uma ou múltiplas associações.

Figura 17 – Notação pé de galinha



Fonte: (REIS, 2017)

Para exemplificar a aplicação do conceito de cardinalidade analisa-se o relacionamento

entre as entidades Operador e Ensaio_campo, apresentado na Figura 18.

A análise de cardinalidades realiza-se mediante processo sistemático: referencia-se inicialmente uma das entidades e avalia-se quantas instâncias da outra entidade podem relacionar-se com a primeira; posteriormente, inverte-se a análise. Aplicando este método, obtém-se:

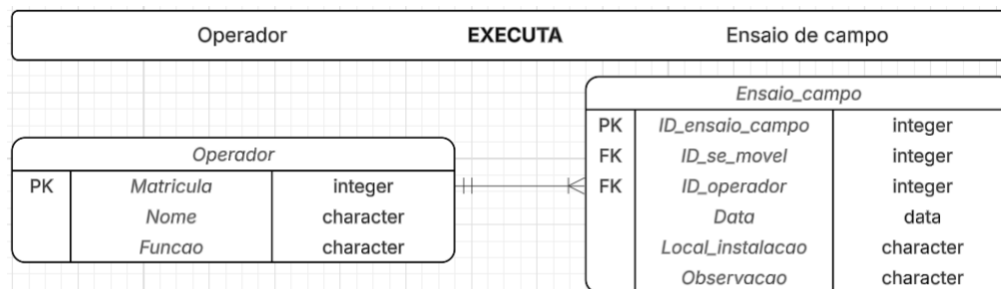
- **Entidade Operador:** Quantos ensaios de campo um operador pode executar?

Resposta: Um ou muitos ensaios de campo (cardinalidade 1..N).

- **Entidade Ensaio_campo:** Quantos operadores podem executar um ensaio de campo?

Resposta: No mínimo um e no máximo um operador (cardinalidade 1..1).

Figura 18 – Exemplo de cardinalidade no DER



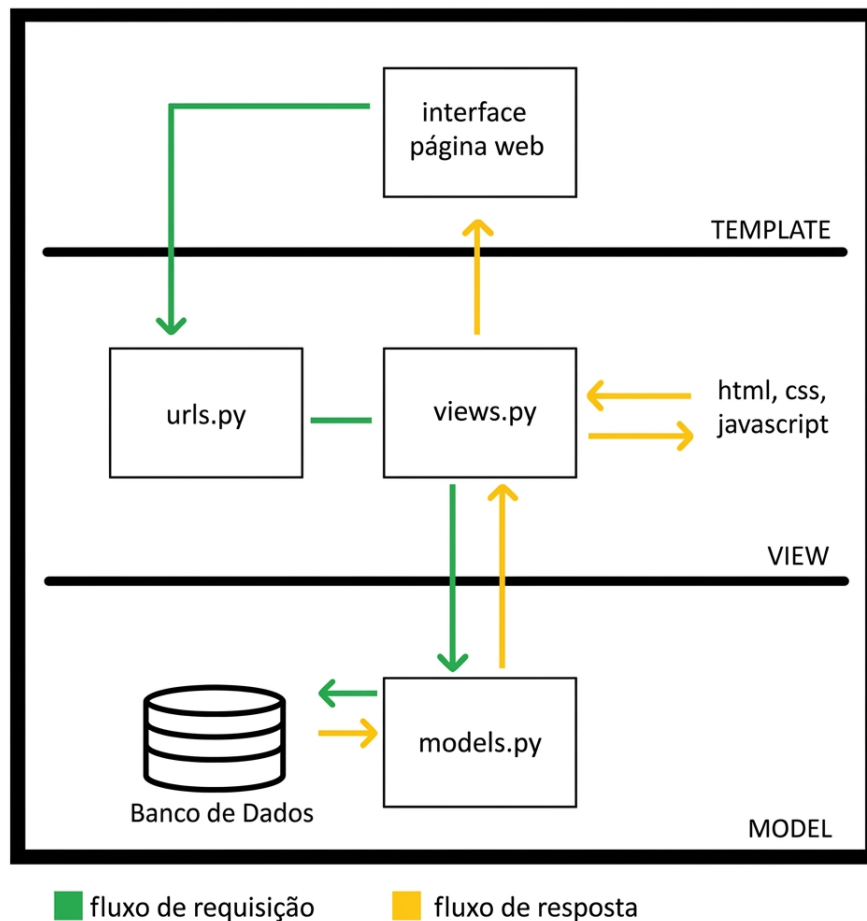
Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

2.5 Django

Django é um *framework web* de código aberto implementado integralmente em *Python*. O projeto nasceu em 2003, no departamento web de um jornal chamado *World Online*, na cidade de *Lawrence, Kansas*, desenvolvido pelos programadores Adrian Holovaty e Simon Willison, e foi liberado como código aberto no verão de 2005. O *framework* destaca-se por fornecer soluções integradas para desafios recorrentes do desenvolvimento *web*, disponibilizando funcionalidades prontas para reutilização, como sistemas de autenticação de usuários, interface administrativa, gerenciamento de *feeds RSS* e mapas de site. Adicionalmente, o framework se declara "reassuringly secure" e "exceedingly scalable"— ou seja, contribui para a prevenção de vulnerabilidades de segurança comuns e proporciona escalabilidade aos sistemas desenvolvidos (Django Software Foundation, 2026c).

Django adota a arquitetura MVT (*Model-View-Template*), ilustrada na Figura 19, na qual o *framework* gerencia automaticamente a maior parte da comunicação baseada em requisições HTTP. A estrutura inicial de um projeto *Django* compreende diretório contendo os arquivos *models.py*, *views.py* e *urls.py*, responsáveis pela implementação do fluxo MVT.

Figura 19 – Fluxo MVT do *Django*



Fonte: Adaptado de (SANTIAGO *et al.*, 2020)

As camadas da arquitetura MVT são descritas a seguir, conforme Santiago (2020):

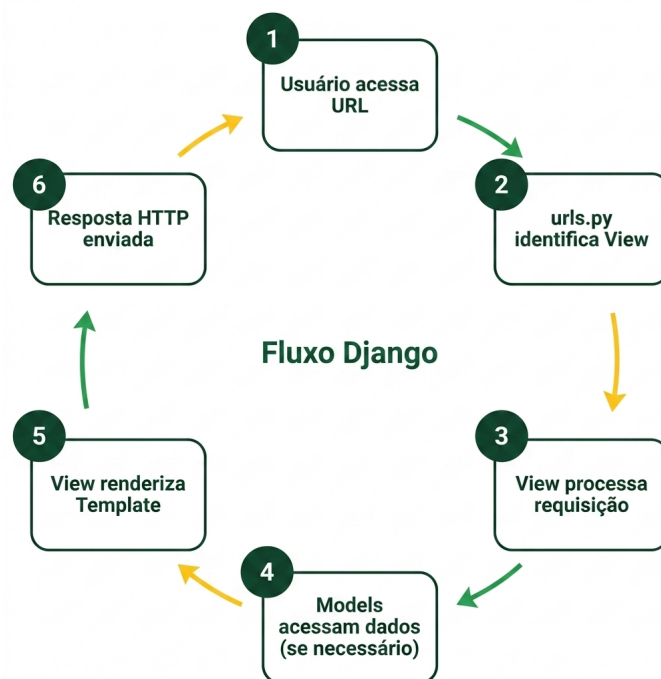
- "*Model*: *Django* já vem com uma solução para mapeamento objeto-relacional(ORM, do inglês *Object-Relational Mapping*) no qual o esquema do banco de dados é descrito em código *Python*. Neste caso, abstrações em *Python* podem ser usadas para criar consultas complexas sem que seja necessário realizar ações diretas no banco.
- *Template*: Esta é a camada de apresentação, onde as informações são visualizadas pelos usuários. Um *template* consiste de partes estáticas do arquivo HTML de saída e de partes com uma sintaxe especial que descrevem como o conteúdo dinâmico será apresentado. O *Django* tem um caminho de pesquisa para *templates*, o qual permite minimizar a redundância entre eles. Geralmente, uma *view* recupera dados de acordo com os parâmetros de pesquisa, carrega um *template* e o renderiza com os dados recuperados.
- *View*: As *views* recebem a informação e o tipo da requisição (“*POST*” ou “*GET*”)do lado do cliente e, em seguida, formatam os dados para que sejam armazenados no banco através dos *models* da camada *Model*. As *views* também se comunicam via *models* com o banco para recuperar dados que são transferidos posteriormente aos *templates*, para a visualização do usuário. Cada *view* é responsável por fazer uma entre duas coisas: devolver um objeto *HTTPResponse* contendo o conteúdo para a página requisitada ou levantar uma exceção como *Http404*."

Uma aplicação *Django* é organizada em torno de três componentes que trabalham de forma integrada (Django Software Foundation, 2026b). O arquivo *models.py* descreve, em código *Python*, a estrutura das tabelas do banco de dados, no que se convencionou chamar de mapeamento objeto-relacional, dispensando a escrita manual de comandos SQL para consultas do dia a dia. O arquivo *urls.py*, chamado de *URLconf*, funciona como um índice que associa cada padrão de endereço a uma função *Python* correspondente, dissociando a estrutura das URLs da lógica de código. Já o arquivo *views.py* concentra essas funções, cada uma responsável por realizar uma entre duas ações: devolver o conteúdo da página solicitada ou sinalizar que o recurso não foi encontrado.

O fluxo de uma requisição, representado na Figura 20, segue essa mesma lógica (Django Software Foundation, 2026b): ao ser acionado por uma URL correspondente, o *Django* repassa a requisição à função de *view* associada; essa função busca os dados necessários, normalmente

por meio do *model* correspondente; em seguida, carrega um *template* e o preenche com esses dados; e devolve o resultado como resposta ao usuário. Essa divisão em camadas independentes, formada por *models*, *views* e *templates*, permite substituir qualquer uma delas isoladamente, sem comprometer o funcionamento das demais. O próprio sistema de *templates* adota, ainda, um mecanismo de herança, no qual um arquivo base concentra os elementos comuns a todas as páginas, e os arquivos derivados preenchem apenas o conteúdo específico de cada tela, reduzindo a duplicação de código entre elas.

Figura 20 – Fluxo de Funcionamento *Django*



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

O *Django* oferece diversos recursos adicionais que contribuem para agilizar o desenvolvimento de aplicações *Web*, entre os quais destacam-se:

- Formulários (*Forms*): possibilitam a coleta de dados fornecidos pelos usuários, realizando automaticamente a conversão para objetos *Python*;
- Autenticação e Controle de Permissões: disponibilizam mecanismos seguros para criação de contas, autenticação de usuários e gerenciamento de permissões de acesso;
- Armazenamento em Cache (*Caching*): melhora o desempenho da aplicação ao reduzir a necessidade de renderização repetitiva de páginas, executando esse processo apenas quando necessário;
- Interface Administrativa: fornece uma interface padrão para administração do sistema, permitindo a criação, visualização e edição de modelos de dados de forma prática e centralizada.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos metodológicos e as principais ferramentas empregadas no desenvolvimento do sistema web de gerenciamento de ensaios em subestações móveis. A metodologia adotada estrutura-se em três etapas sequenciais: modelagem do banco de dados, implementação do banco de dados relacional PostgreSQL incluindo povoamento com dados reais e fictícios, e desenvolvimento da aplicação *web* utilizando *framework Django* integrando interface visual e lógica de negócio.

3.1 Modelagem e Implementação do Banco de Dados

A implementação de um banco de dados relacional requer, como etapa preliminar fundamental, a realização de sua modelagem, com o objetivo de estruturar e organizar adequadamente as informações. Tal abordagem contribui para a redução de redundâncias e inconsistências, além de facilitar atividades de manutenção e futuras evoluções do sistema. Ademais, a modelagem possibilita a garantia da integridade dos dados por meio da aplicação de conceitos como chaves primárias, chaves estrangeiras e restrições, assegurando a confiabilidade das informações ao longo do tempo.

O banco de dados desenvolvido neste trabalho tem como finalidade armazenar informações relacionadas ao processo de execução de ensaios em subestações móveis durante seu comissionamento em campo. Nesse contexto, torna-se necessário o armazenamento de dados referentes às características técnicas dessas subestações, incluindo identificação, níveis de tensão e potência nominal; os operadores responsáveis pela realização dos ensaios; os resultados obtidos tanto em ensaios de fábrica quanto nos ensaios realizados em campo; bem como à classificação dos diferentes tipos de ensaios executados. Essa estrutura possibilita a realização de análises comparativas entre os resultados de fábrica e os obtidos em campo, viabilizando, inclusive, a posterior geração de painéis de visualização de dados.

Para a modelagem do banco de dados proposto, foram consideradas algumas das principais etapas necessárias à obtenção de um modelo consistente. Dentre essas etapas destacam-se: o levantamento de requisitos, a definição das entidades, atributos e relacionamentos e elaboração do diagrama entidade-relacionamento (CANEDO, 2007). Após a conclusão dessas etapas, procedeu-se à implementação do banco de dados no sistema gerenciador de banco de dados PostgreSQL. Os próximos subcapítulos têm como objetivo apresentar, de forma detalhada, cada uma das etapas adotadas, bem como descrever o processo de implementação do banco de dados relacional.

3.1.1 Levantamento de requisitos

Inicialmente, foram definidos os requisitos do banco de dados, os quais têm como finalidade fornecer a base para sua modelagem. Esses requisitos correspondem ao conjunto de

necessidades, regras e expectativas que o sistema deve atender no que se refere ao armazenamento, à organização e à manipulação dos dados. Os requisitos estabelecidos para este projeto encontram-se na Tabela 3:

Tabela 3 – Levantamento de requisitos do BD

Item	Requisito
1	Registrar informações fixas das subestações móveis
2	Registrar os valores de ensaios de referência (fornecedor/fábrica)
3	Registrar ensaios de campo
4	Permitir comparação entre valores de referência e medições de campo ao longo do tempo (filtrar por data)
5	Permitir análises por ensaio, por TAP, por fase e por data
6	Permitir rastreabilidade (responsável, local, data)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

3.1.2 Modelo Entidade-Relacionamento

Nessa etapa, são identificados os esquemas das entidades e apresentado o Diagrama Entidade-Relacionamento do projeto. Os esquemas são descritos por meio de tabelas contendo as entidades, seus atributos, os respectivos domínios e a identificação das chaves primárias e estrangeiras. O DER, por sua vez, traduz graficamente os relacionamentos entre as entidades modeladas, sendo apresentado ao final desta seção. Para sua elaboração, utilizou-se o aplicativo *Lucidchart*, ferramenta voltada à criação de diagramas e fluxogramas.

- Operador: Essa entidade traz as informações básicas do técnico responsável por realizar os ensaios no campo.

Tabela 4 – Operador

Operador		
Chave	Atributo	Domínio
PK	Matricula	<i>integer</i>
	Nome	<i>character</i>
	Função	<i>character</i>

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

- se_movel: Essa entidade compila as informações básicas da SE móvel que terão seus equipamentos ensaiados.

Tabela 5 – SE_movel

SE_movel		
Chave	Atributo	Domínio
PK	ID_se_movel	<i>integer</i>
	Nome	<i>character</i>
	Fabricante	<i>character</i>
	Tensao_primaria_1_kV	<i>numeric</i>
	Tensao_primaria_2_kV	<i>numeric</i>
	Tensao_secundaria_kV	<i>numeric</i>
	Potencia_MVA	<i>numeric</i>

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

- tipo_ensaio: Essa entidade apresenta a classificação dos ensaios que serão realizados, como resistência de isolamento, resistência de contato, oscilografia etc.

Tabela 6 – tipo_ensaio

Tipo_ensaio		
Chave	Atributo	Domínio
PK	ID_tipo_ensaio	<i>integer</i>
	Nome_ensaio	<i>character</i>
	Descrição	<i>character</i>
	Unidade_medida	<i>numeric</i>

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

- ensaio_referencia: Essa entidade mostra os valores de ensaios que foram realizados em fábrica para cada SE móvel. Esses são os valores de referência que foram usados para comparação com os ensaios de campo.

Tabela 7 – Ensaio_referencia

Ensaio_referencia		
Chave	Atributo	Domínio
PK	ID_ensaio_ref	<i>integer</i>
FK	ID_se_movel	<i>integer</i>
FK	ID_tipo_ensaio	<i>integer</i>
	TAP	<i>numeric</i>
	Fase	<i>numeric</i>
	Resultado_referencia	<i>numeric</i>
	Unidade_medida	<i>character</i>
	Temp_Ambiente	<i>numeric</i>
	Observações	<i>character</i>

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

- **ensaios_campo**: Essa entidade permite criar a identificação para um determinado ensaio de campo. Recebe informações como data, executante dos ensaios de campo em uma determinada SE móvel e onde foram realizados os ensaios.

Tabela 8 – Ensaio_campo

Ensaio_campo		
Chave	Atributo	Domínio
PK	ID_ensaio_campo	<i>integer</i>
FK	ID_se_movel	<i>integer</i>
FK	ID_operador	<i>integer</i>
	Data	<i>data</i>
	Local_instalação	<i>character</i>
	Observação	<i>character</i>

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

- **resultados_campo**: Essa entidade compila os valores de todos ensaios de campo executados em uma SE móvel em uma determinada data e local.

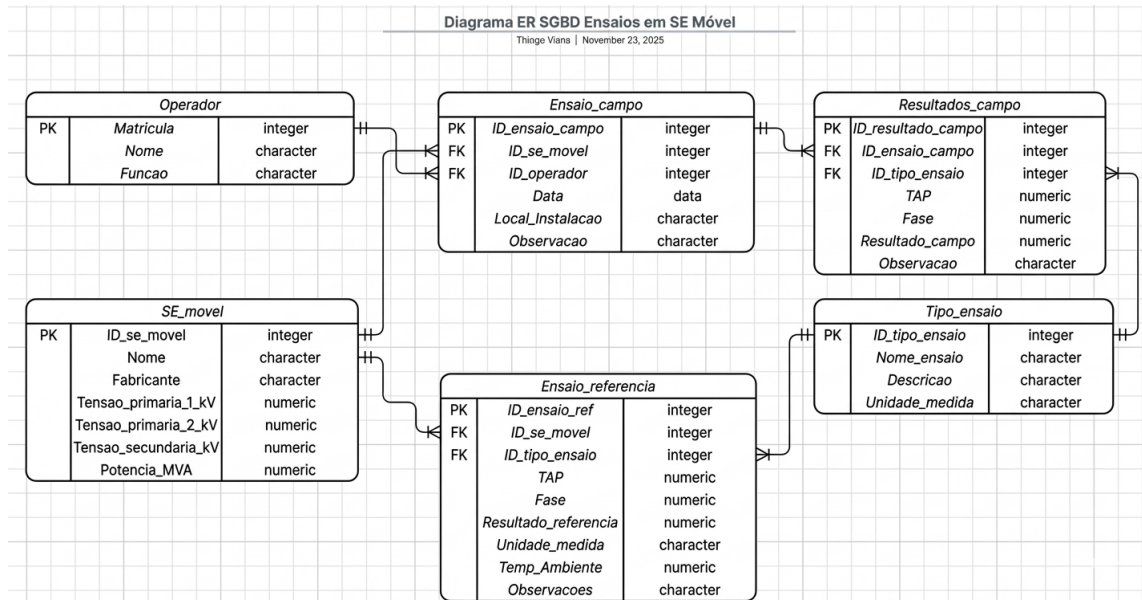
Tabela 9 – Resultados_campo

Resultados_campo		
Chave	Atributo	Domínio
PK	ID_resultado_campo	<i>integer</i>
FK	ID_ensaio_campo	<i>integer</i>
FK	ID_tipo_ensaio	<i>integer</i>
	TAP	<i>numeric</i>
	Fase	<i>numeric</i>
	Resultado_campo	<i>numeric</i>
	Observação	<i>character</i>

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

3.1.2.1 Diagrama Entidade-Relacionamento

Figura 21 – Diagrama Entidade-Relacionamento



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

3.1.3 Implementação do Banco de Dados

A implementação do banco de dados demanda utilização de um Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados (SGBD). Diversas soluções estão disponíveis no mercado, incluindo PostgreSQL, MySQL, Microsoft SQL Server e SQLite, entre outras. Para este projeto, optou-se pelo PostgreSQL, sistema de gerenciamento de banco de dados objeto-relacional de código aberto baseado na linguagem SQL. As origens do PostgreSQL remontam a 1986, como parte do projeto POSTGRES desenvolvido na Universidade da Califórnia em Berkeley, acumulando quase 40 anos de desenvolvimento ativo em sua plataforma principal (GROUP, 2026). A escolha justifica-se adicionalmente por sua robustez, confiabilidade e escalabilidade, características que o tornam uma solução adequada para o gerenciamento seguro e eficiente dos dados da aplicação.

A seguir, ilustra-se por meio da Figura 22, a tela inicial do PostgreSQL.

O Anexo A deste trabalho apresenta o código completo utilizado na criação do banco de dados. No entanto, a Figura 23 ilustra um exemplo do código empregado para a criação da entidade Ensaio_referencia. Observa-se que, na definição da tabela, foram especificados os atributos com seus respectivos tipos de dados, sendo adotados campos numéricos (NUMERIC) para o armazenamento de valores de TAP, resultado de referência e temperatura ambiente, e campos textuais (VARCHAR e TEXT) para fase, unidade de medida e observações. Adicionalmente, foram implementadas restrições de integridade referencial mediante o uso de chaves estrangeiras (Foreign Keys), estabelecendo vínculos entre a entidade Ensaio_referencia e as tabelas SE_movel

Figura 22 – Exemplo de tela PostgreSQL

id_ensaio_ref	id_se_mov	id_tipo_ensaio	tap	fase	resultado_referencia	unidade_medida	temp_ambiente	observacoes
1	1	20090	1	[null]	277000.00	MQ	26.00	Resultado de testes em fábrica
2	2	20090	2	[null]	59100.00	MQ	26.00	Resultado de testes em fábrica
3	3	20090	3	[null]	159000.00	MQ	26.00	Resultado de testes em fábrica
4	4	20090	4	[null]	18800.00	MQ	26.00	Resultado de testes em fábrica
5	5	20090	5	[null]	1850000.00	MQ	27.00	Resultado de testes em fábrica
6	6	20090	6	[null]	217000.00	MQ	27.00	Resultado de testes em fábrica
7	7	20090	7	[null]	500000.00	MQ	27.00	Resultado de testes em fábrica
8	8	20090	8	[null]	12200000.00	MQ	23.00	Resultado de testes em fábrica
9	9	20090	8	[null]	1660000.00	MQ	23.00	Resultado de testes em fábrica

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

e Tipo_ensaio. Tais restrições asseguram que o registro de um ensaio de referência somente seja permitido quando a subestação móvel e o tipo de ensaio correspondentes já se encontrarem devidamente cadastrados no banco de dados, garantindo, assim, a consistência e a confiabilidade das informações armazenadas.

Figura 23 – Código para criação da entidade Ensaio_referencia

```

Query  Query History
1  -- =====
2  -- TABELA: Ensaio_referencia
3  -- =====
4
5  CREATE TABLE Ensaio_referencia (
6      ID_ensaio_ref INTEGER PRIMARY KEY,
7      ID_se_mov INTEGER NOT NULL,
8      ID_tipo_ensaio INTEGER NOT NULL,
9      TAP NUMERIC(10,2),
10     Fase VARCHAR(10),
11     Resultado_referencia NUMERIC(15,6),
12     Unidade_medida VARCHAR(20),
13     Temp_ambiente NUMERIC(5,2),
14     Observacoes TEXT,
15     CONSTRAINT fk_ensaio_ref_se FOREIGN KEY (ID_se_mov)
16         REFERENCES SE_mov (ID_se_mov) ON DELETE CASCADE,
17     CONSTRAINT fk_ensaio_ref_tipo FOREIGN KEY (ID_tipo_ensaio)
18         REFERENCES Tipo_ensaio (ID_tipo_ensaio) ON DELETE RESTRICT
19 );

```

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

3.1.3.1 Preenchimento do banco de dados

Para o preenchimento do banco de dados e a validação do sistema desenvolvido, foram estabelecidas as seguintes premissas:

- O cadastro de informações de quatro subestações móveis;
- A utilização de dados reais provenientes de documentos internos da CEMIG para o preenchimento das informações cadastrais e dos valores de ensaios de referência;
- A geração fictícia dos resultados de ensaios de campo, com valores definidos propositalmente para viabilizar a realização de testes funcionais do sistema. Foram registradas três campanhas de ensaios de campo por subestação móvel, totalizando doze campanhas;
- A substituição dos nomes e dos fabricantes das subestações móveis por identificações genéricas, por questões de privacidade;
- O cadastro de quatro operadores.

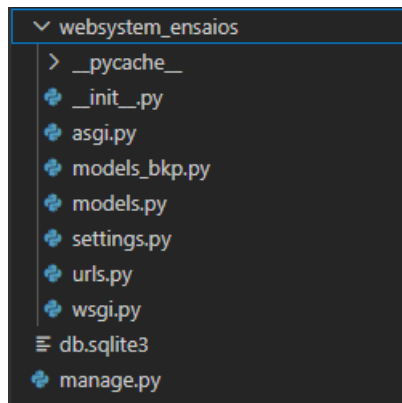
A adoção dessas premissas resultou em um volume total de 1.428 itens de ensaio cadastrados no banco de dados, quantidade considerada suficiente para a realização de uma análise abrangente do funcionamento e do desempenho do sistema proposto.

3.2 Desenvolvimento da aplicação Web

O desenvolvimento da aplicação web foi realizado utilizando o *framework Django* 6.0, estruturado conforme as convenções do padrão MVT. A organização do código segue uma hierarquia de dois níveis: o Projeto *Django* (*websystem_ensaios*), que centraliza as configurações globais da aplicação, e a Aplicação *Django* (*ensaios*), que concentra toda a lógica de negócio relacionada ao gerenciamento de ensaios em subestações móveis. Esta seção apresenta a estrutura de arquivos implementada e o papel dos principais componentes no funcionamento do sistema. O código completo responsável pelo desenvolvimento da aplicação encontra-se disponível no Anexo A deste trabalho.

3.2.1 Projeto Django

A Figura 24 apresenta a estrutura do Projeto *Django* (*Websystem_ensaios*) que foi gerada automaticamente ao iniciar o projeto. Posteriormente, apresenta-se uma breve explicação das funções dos principais arquivos do referido diretório.

Figura 24 – Estrutura base do projeto *Django*

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

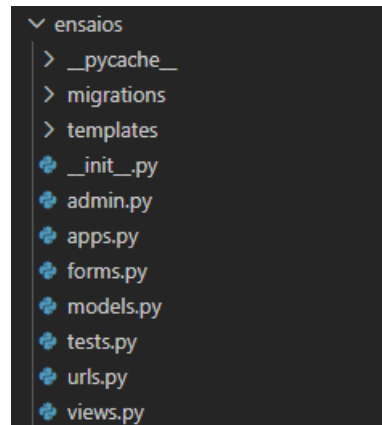
- **Settings.py:** O arquivo *settings.py* centraliza todas as configurações do Projeto *Django*, definindo parâmetros essenciais para o funcionamento da aplicação. Este arquivo estabelece a conexão com o banco de dados PostgreSQL, registra aplicações instaladas, configura camadas de segurança através de *middlewares*, define internacionalização em português brasileiro e parametriza o sistema de autenticação de usuários.
- **Models.py:** O arquivo *models.py* mapeia as tabelas internas do *Django* para classes *Python*, permitindo interação com o sistema de autenticação, administração e sessões através do ORM. Este arquivo contém classes que representam usuários, grupos, permissões, sessões ativas e registros de auditoria, além de tabelas intermediárias que gerenciam relacionamentos entre usuários, grupos e permissões.
- **Urls.py:** O arquivo *urls.py* implementa o roteamento principal da aplicação, definindo o mapeamento entre *URLs* e suas respectivas *views* ou módulos de roteamento. Este arquivo estabelece duas rotas essenciais: a interface administrativa *Django* acessível em */admin/* e a delegação de todas as demais *URLs* para a aplicação ensaios através da função *include()*.
- **Manage:** O arquivo *manage.py* funciona como interface de linha de comando para execução de tarefas administrativas do Projeto *Django*. Este *script* configura o ambiente *Django* através da variável *DJANGO_SETTINGS_MODULE* e disponibiliza comandos essenciais para desenvolvimento, incluindo inicialização do servidor, acesso ao *shell* interativo, validação de configurações, criação de usuários administradores e coleta de arquivos estáticos.

3.2.2 Aplicação Django

A aplicação ensaios concentra toda a lógica de negócio relacionada ao gerenciamento de ensaios em subestações móveis. Implementada por meio do diretório apresentado na Figura 25, seis arquivos principais estruturam os dados, processam requisições, validam entradas e

renderizam interfaces. Esta aplicação, desenvolvida seguindo o padrão MVT do *Django*, integra-se ao banco de dados PostgreSQL criado na seção 3.1.3 através do ORM, permitindo operações de consulta, inserção, atualização e exclusão de dados sem necessidade de *queries SQL* diretas.

Figura 25 – Estrutura da Aplicação Ensaaios



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

- **Models.py:** O arquivo *models.py* define a estrutura de dados da aplicação através de 6 classes *Python* que mapeiam tabelas do banco de dados PostgreSQL. Este arquivo implementa os *models* Operador (técnicos responsáveis por ensaios), SeMovel (subestações móveis), TipoEnsaio (catálogo de tipos de ensaios), EnsaioReferencia (valores de fábrica para comparação), EnsaioCampo (registro de ensaios realizados em campo) e ResultadosCampo (resultados individuais de cada medição), estabelecendo relacionamentos via *ForeignKey* e configurando todas as classes com *managed=False* para indicar que a estrutura das tabelas é gerenciada externamente.
- **Forms.py:** O arquivo *forms.py* implementa 4 formulários *Django* baseados em *ModelForm* que realizam validação automática de dados de entrada. Este arquivo define *EnsaioCampoForm* (cadastro de novos ensaios de campo), *ResultadoCampoForm* (registro de resultados individuais), *SeMovelForm* (cadastro de subestações móveis) e *EnsaioReferenciaForm* (registro de valores de referência), cada um configurado com *widgets Bootstrap* para apresentação visual, *labels* em português e validações de tipos de dados, campos obrigatórios e relacionamentos entre tabelas.
- **Urls.py:** O arquivo *urls.py* define o sistema de roteamento da aplicação através de 14 rotas mapeadas na lista *urlpatterns*. Este arquivo estabelece o namespace *app_name='ensaios'* permitindo referências únicas através da sintaxe *ensaios:nome_da_rota*, e mapeia *URLs* para *views* correspondentes incluindo rotas para autenticação de usuários, página inicial, cadastro de ensaios e resultados, listagens com filtros, visualização de detalhes, comparações entre ensaios e *dashboard* analítico.

- **Admin.py:** O arquivo *admin.py* configura a interface administrativa *Django* para os 6 *models* da aplicação, permitindo gerenciamento de dados através da interface *web* acessível em */admin/*. Este arquivo define classes *Admin* customizadas (*OperadorAdmin*, *SeMovelAdmin*, *TipoEnsaioAdmin*, *EnsaioReferenciaAdmin*, *EnsaioCampoAdmin* e *ResultadosCampoAdmin*) que especificam colunas exibidas nas listagens, filtros laterais, campos de busca e hierarquia de datas para navegação temporal.
- **Templates:** O diretório *templates/ensaios/* contém os 13 arquivos HTML que implementam a interface visual do sistema. Este diretório armazena *templates* para páginas de login e autenticação, *dashboard* analítico com gráficos interativos, formulários de cadastro de ensaios e resultados, listagens de ensaios com filtros e ordenação, visualização de detalhes de ensaios, comparações entre valores de referência e medições de campo, e comparações entre ensaios de campo, utilizando sistema de herança *Django* através do *template base.html* e *frameworks Bootstrap 5.3* para responsividade e *Chart.js 4.4* para visualizações gráficas.
- **Views.py:** O arquivo *views.py* implementa o núcleo da lógica de negócio do sistema através de 18 funções *Python* que processam requisições HTTP, executam algoritmos de classificação, realizam cálculos comparativos e geram visualizações analíticas. Este arquivo contém as principais funcionalidades que transformam dados brutos de ensaios em informações úteis para tomada de decisão técnica. O subcapítulo a seguir, 3.2.2.1, apresenta as principais funções implementadas para o sistema.

3.2.2.1 Principais funções do sistema

- **Cadastro de ensaios de campo:** A função *novo_ensaio_campo()* processa formulário de cadastro de novos ensaios utilizando *EnsaioCampoForm*. Esta view implementa geração automática de IDs sequenciais através de *query* que identifica o último registro e incrementa em uma unidade.
- **Algoritmo de Classificação Automática de Status:** A função *calcular_status_resultado()* implementa lógica central de classificação automática de resultados de ensaios. Esta função recebe dois parâmetros numéricos (resultado de campo e valor de referência) e retorna tupla contendo status classificado (“OK”, “ATENÇÃO” ou “CRÍTICO”) e código de cor correspondente para interface visual.

Os critérios de classificação implementados no algoritmo foram definidos com base em documentos técnicos de fabricantes e normas de boas práticas de engenharia elétrica. A seguir, apresentam-se os critérios específicos para cada tipo de ensaio:

- **Relação de Transformação:** Para ensaios de relação de transformação em transformadores, TSAs e TPs, foi estabelecido status "OK" quando o desvio percentual entre valor medido e nominal não excede $\pm 0,5\%$, conforme critério técnico apresentado

na seção 2.3.3. Desvios superiores a este limite recebem classificação "CRÍTICO", indicando necessidade de avaliação técnica imediata.

- **Oscilografia - Tempo de Abertura:** Para o ensaio de tempo de abertura em oscilografia, estabeleceu-se status "OK" para tempos iguais ou inferiores a 37 ms, e status "CRÍTICO" para valores superiores. Este critério foi especificado conforme manual técnico do fabricante dos disjuntores das subestações móveis, considerando limites de segurança operacional do equipamento.
- **Oscilografia - Tempo de Fechamento:** O ensaio de tempo de fechamento em oscilografia segue critério análogo ao de abertura, estabelecendo status "OK" para tempos iguais ou inferiores a 100 ms, e status "CRÍTICO" para valores superiores. Este limite também foi definido conforme especificações técnicas do fabricante.
- **Resistência de Contato:** O critério de classificação para ensaios de resistência de contato baseou-se nas especificações do manual técnico do fabricante, que estabelece que o valor medido não deve exceder em 20% o resultado de fábrica. Dessa forma, o algoritmo implementa três faixas de classificação: desvios menores que 15% recebem status "OK", desvios entre 15% e 20% recebem status "ATENÇÃO" (indicando necessidade de monitoramento), e desvios superiores a 20% recebem status "CRÍTICO" (indicando necessidade de intervenção).
- **Resistência de Isolamento:** Conforme abordado na seção 2.3.1, o ensaio de resistência de isolamento constitui indicador qualitativo da condição do isolamento, não apresentando critérios rígidos de aprovação ou rejeição estabelecidos em normas. Por este motivo, resultados deste ensaio recebem sempre status "OK" quando há valor registrado, sendo o desvio percentual calculado apenas para acompanhamento histórico da evolução da condição de isolamento do equipamento ao longo do tempo.
- **Comparações entre ensaios:** A *view* `comparacao_resultados()` implementa funcionalidade de comparação entre valores de referência obtidos em fábrica e as medições de campo mais recentes para uma determinada subestação móvel. Esta função executa *query* que recupera o último ensaio de campo através de ordenação decrescente por data, obtém todos os resultados deste ensaio via relacionamento ORM, e para cada resultado, busca o valor de referência correspondente através de *matching* em tipo de ensaio, tap e fase. Após localizar o par referência-campo, a função aplica o algoritmo `calcular_status_resultado()` para classificação automática, calcula o desvio percentual para exibição numérica, e retorna lista estruturada para renderização em *template* HTML com código de cores indicativo do status.

A *view* `comparacao_campo_vs_campo()` complementa esta funcionalidade implementando comparação entre dois ensaios de campo distintos, permitindo análise temporal da evolução de valores medidos ao longo do tempo. Esta função recebe via POST os identificadores de dois ensaios, valida que ambos pertencem à mesma subestação móvel para garantir

comparabilidade, recupera os resultados de ambos os ensaios, e executa comparação par a par considerando tipo de ensaio, tap e fase para garantir que apenas medições equivalentes sejam comparadas.

- **Dashboard:** A *view* `dashboard()` implementa funcionalidade de geração de painel analítico consolidando dados de múltiplas tabelas do sistema em 9 visualizações gráficas interativas. A função utiliza recursos de agregação do *Django* (`annotate()`, `Count()`, `Avg()`) para executar cálculos diretamente no banco de dados, evitando processamento de grandes volumes em memória *Python* e garantindo performance adequada. Os dados agregados são estruturados em formato JSON e retornados via dicionário de contexto para renderização através da biblioteca *Chart.js* no *template* HTML. As visualizações gráficas implementadas são apresentadas detalhadamente no Capítulo 4 (Resultados).

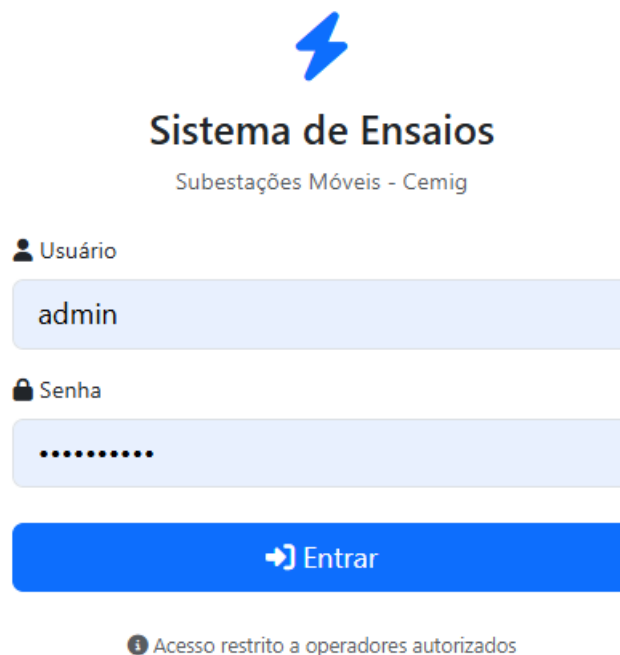
4 RESULTADOS

Neste capítulo é apresentado o sistema web de gerenciamento de ensaios elétricos em subestações móveis, desenvolvido conforme a metodologia descrita no capítulo anterior. São demonstradas as principais telas da aplicação e suas respectivas funcionalidades, evidenciando como o sistema atende aos requisitos funcionais estabelecidos no levantamento de requisitos.

4.1 Tela Autenticação

O acesso ao sistema é realizado por meio do comando `python manage.py runserver`, executado dentro do ambiente virtual do projeto, o qual inicializa o servidor de desenvolvimento *Django* e disponibiliza a aplicação em endereço local. Ao acessar o endereço gerado, o usuário é automaticamente redirecionado para a tela de autenticação, ilustrada na Figura 26, na qual deve inserir suas credenciais de login e senha previamente cadastradas. Essa funcionalidade garante que o acesso ao sistema seja restrito a operadores autorizados, atendendo ao requisito de rastreabilidade estabelecido em RF6.

Figura 26 – Tela de Autenticação



A imagem mostra a interface de autenticação do 'Sistema de Ensaios'. No topo, há um ícone de relâmpago azul. Abaixo dele, o título 'Sistema de Ensaios' em negrito, seguido pelo subtítulo 'Subestações Móveis - Cemig'. O formulário contém dois campos de entrada: 'Usuário' com o texto 'admin' e 'Senha' com pontos para ocultar o texto. Abaixo dos campos, há um botão azul com o texto 'Entrar' e um ícone de seta para a direita. Na base, uma mensagem de informação indica 'Acesso restrito a operadores autorizados'.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

4.2 Tela Início

Após a validação das credenciais, o sistema redireciona o usuário para a tela inicial, apresentada na Figura 27. Essa tela funciona como painel de navegação central da aplicação, exibindo três indicadores de resumo do sistema: o número de subestações móveis cadastradas, a quantidade de campanhas de ensaios realizados e o número de operadores ativos.

A tela inicial também disponibiliza acesso direto às principais funcionalidades do sistema por meio de cartões de navegação, sendo eles: Novo Ensaio, para registro de novas campanhas de ensaios de campo; Consultar Ensaios, para visualização do histórico e resultados; Comparação, para análise comparativa entre valores de referência e medições de campo; e *Dashboard*, para acesso às visualizações gráficas e análises consolidadas.

Figura 27 – Tela inicial



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

4.3 Novo Ensaio de Campo

A tela de cadastro de novo ensaio de campo, apresentada na Figura 28, é acessada por meio do botão "Novo Ensaio". Nessa tela, o operador registra as informações gerais da campanha de ensaios que será realizada, sendo elas: a subestação móvel a ser ensaiada, selecionada por meio de lista suspensa contendo as SEs móveis cadastradas no sistema; a data do ensaio; o local de instalação, campo textual destinado à identificação da subestação fixa onde a SE móvel está sendo instalada; e um campo de observações gerais, de preenchimento opcional, para registro de informações adicionais relevantes sobre a campanha.

Após o preenchimento dos dados, o operador aciona o botão "Continuar para Resultados", que direciona para a tela de inserção dos resultados individuais de cada ensaio realizado,

Figura 28 – Novo Ensaio de Campo

+

Novo Ensaio de Campo

SE Móvel

SE MOVEL 1 - FABRICANTE 1

▼

Selecione a SE Móvel que será ensaiada

Data do Ensaio

16/05/2026

📅

Local de Instalação

Ex: SE Barreiro

Observações Gerais

Observações gerais sobre o ensaio...

← Voltar

→ Continuar para Resultados

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

mantendo o vínculo com o registro de campanha recém-criado. Essa estrutura em duas etapas, primeiro o cadastro da campanha e depois o lançamento dos resultados, reflete diretamente a modelagem do banco de dados, na qual a tabela Ensaio_campo armazena os dados gerais e a tabela Resultados_campo armazena os valores individuais de cada medição. A Figura 29 apresenta o formulário onde os resultados de ensaios de campo são registrados.

Figura 29 – Registro de Resultados de Ensaios

Registro de Resultados de Ensaios						Salvar Todos os Resultados
Tipo de Ensaio	TAP	Fase	Valor Referência	Resultado Campo	Observação	
Resistência isolamento Trafo principal AT+BT-M	TAP	---	277000,00 MΩ	Digite o result.	Observações...	
Resistência isolamento Trafo principal AT+M-BT	TAP	---	59100,00 MΩ	Digite o result.	Observações...	
Resistência isolamento Trafo principal BT+M-AT	TAP	---	159000,00 MΩ	Digite o result.	Observações...	
Resistência isolamento núcleo Núcleo+M	TAP	---	18800,00 MΩ	Digite o result.	Observações...	
Resistência isolamento TSA - AT+BT-M	TAP	---	1850000,00 MΩ	Digite o result.	Observações...	
Resistência isolamento TSA - AT+M-BT	TAP	---	217000,00 MΩ	Digite o result.	Observações...	
Resistência isolamento TSA - BT+M-AT	TAP	---	500000,00 MΩ	Digite o result.	Observações...	

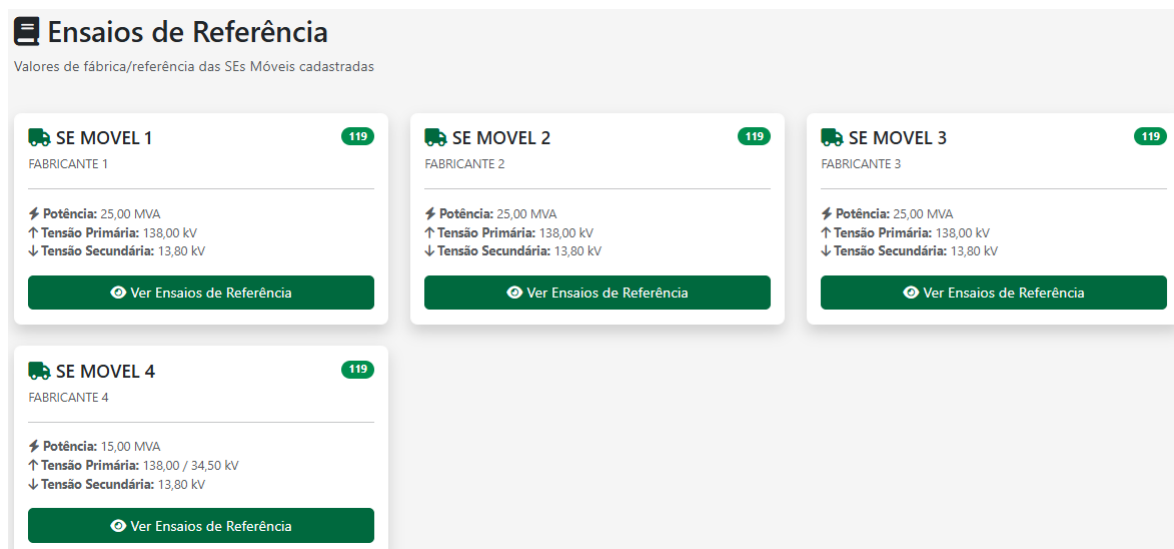
Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

4.4 Tela Ensaio de Referência

A tela de Ensaio de Referência, apresentada na Figura 30, exibe as subestações móveis cadastradas no sistema juntamente com suas principais características técnicas, sendo elas: fabricante, potência nominal, tensão primária e tensão secundária. Para cada subestação, é exibido um indicador numérico com o total de ensaios de referência cadastrados, sendo 119

registros por SE móvel no caso ilustrado. O acesso aos valores detalhados de cada subestação é realizado por meio do botão "Ver Ensaio de Referência".

Figura 30 – Tela Ensaio de Referência



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

Ao acionar o botão "Ver Ensaio de Referência", o sistema redireciona para a tela detalhada da subestação selecionada, ilustrada na Figura 31. Nessa tela, um cabeçalho exibe as informações cadastrais da SE móvel considerando o fabricante, número de série, potência e tensões nominais; seguido de três indicadores: o total de ensaios de referência cadastrados, a quantidade de tipos diferentes de ensaios e o status de cadastro da subestação no sistema.

A tabela principal lista todos os ensaios de referência da subestação. Os valores de resultado são destacados em azul, facilitando a leitura. No exemplo ilustrado, são exibidos os primeiros registros de ensaios de oscilografia do equipamento de manobra de alta tensão, com tempos de abertura e fechamento obtidos em fábrica, que servirão como valores de referência para comparação com os ensaios realizados em campo.

Figura 31 – Exemplo de Resultados de Referência

SE MOVEL 1

Fabricante: FABRICANTE 1

Número de Série: 20090

Potência: 25,00 MVA | Tensões: 138,00 kV → 13,80 kV

← Voltar

Imprimir

TOTAL DE ENSAIOS

119

TIPOS DIFERENTES

119

STATUS

✓ Cadastrado

Ensaio de Referência - Valores de Fábrica

#	Tipo de Ensaio	TAP	Fase	Resultado	Unidade	Temp. (°C)	Observações
1	Oscilografia equipamento de manobra AT - Abertura 1	-	A	28,10	ms	-	Resultado de testes em fábrica
2	Oscilografia equipamento de manobra AT - Abertura 1	-	B	27,90	ms	-	Resultado de testes em fábrica
3	Oscilografia equipamento de manobra AT - Abertura 1	-	C	29,30	ms	-	Resultado de testes em fábrica
4	Oscilografia equipamento de manobra AT - Abertura 2	-	A	28,00	ms	-	Resultado de testes em fábrica
5	Oscilografia equipamento de manobra AT - Abertura 2	-	B	27,70	ms	-	Resultado de testes em fábrica
6	Oscilografia equipamento de manobra AT - Abertura 2	-	C	29,20	ms	-	Resultado de testes em fábrica
7	Oscilografia equipamento de manobra AT - Fechamento	-	A	79,50	ms	-	Resultado de testes em fábrica

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

4.5 Tela Consultar Ensaio

A tela de consulta de ensaios de campo, apresentada na Figura 32, exibe o histórico completo de campanhas de ensaios registradas no sistema. A listagem é organizada em ordem cronológica e apresenta, para cada campanha, a subestação móvel ensaiada, a data de realização, o local de instalação e o operador responsável. Para cada registro, estão disponíveis dois botões de ação: "Ver", que direciona para a visualização detalhada dos resultados da campanha, e "+ Resultados", que permite a inserção de novos resultados para aquele ensaio.

A tela disponibiliza ainda um conjunto de filtros localizado na parte superior, permitindo ao usuário refinar a listagem por subestação móvel, mediante seleção em lista suspensa, e por período, mediante definição de data de início e data de fim. Essa funcionalidade atende diretamente ao requisito RF4, que estabelece a necessidade de permitir comparações e consultas filtradas por data, e ao requisito RF5, que prevê análises por SE móvel.

Ao acionar o botão "Ver" de uma campanha, o sistema redireciona para a tela de detalhamento do ensaio, ilustrada na Figura 33. Nessa tela, um cabeçalho exibe as informações gerais da campanha, garantindo a rastreabilidade prevista no requisito RF6. Abaixo do cabeçalho, uma tabela lista todos os resultados individuais da campanha, indicando para cada medição o tipo de ensaio, o TAP, a fase, o valor obtido com sua respectiva unidade e as observações registradas. No exemplo ilustrado, são exibidos os primeiros registros de ensaios de resistência de isolamento da SE Móvel 1, realizados em 20/05/2025 na SE Paracatu 7, totalizando 119 medições registradas nessa campanha.

Figura 32 – Lista de campanhas registradas

Ensaio de Campo

+ Novo Ensaio

SE Móvel

Todas

Data Início

dd/mm/aaaa

Data Fim

dd/mm/aaaa

Filtrar

SE Móvel	Data	Local	Operador	Ações
SE MOVEL 1	20/05/2025	SE Paracatu 7	OPERADOR 1	Ver + Resultados
SE MOVEL 2	02/07/2025	SE Alfenas 1	OPERADOR 3	Ver + Resultados
SE MOVEL 4	17/07/2025	SE Lagoa Grande 1	OPERADOR 2	Ver + Resultados
SE MOVEL 3	30/07/2025	SE Ipatinga 2	OPERADOR 1	Ver + Resultados
SE MOVEL 2	06/09/2025	SE Sta Rita do Sapucaí	OPERADOR 2	Ver + Resultados
SE MOVEL 4	28/10/2025	SE João Pinheiro 2	OPERADOR 1	Ver + Resultados

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

Figura 33 – Exemplo prático de uma consulta

Informações do Ensaio

SE Móvel: SE MOVEL 1

Fabricante: FABRICANTE 1

Potência: 25,00 MVA

Data do Ensaio: 20/05/2025

Local: SE Paracatu 7

Operador: OPERADOR 1 (Técnico de campo)

Resultados dos Ensaio (119)

#	Tipo de Ensaio	TAP	Fase	Resultado	Observação
1	Resistência isolamento Trafo principal AT+BT-M	-	-	478658,60 MΩ	-
2	Resistência isolamento Trafo principal AT+M-BT	-	-	119828,88 MΩ	-
3	Resistência isolamento Trafo principal BT+M-AT	-	-	76879,15 MΩ	-
4	Resistência isolamento núcleo Núcleo+M	-	-	3747,73 MΩ	-
5	Resistência isolamento TSA - AT+BT-M	-	-	1993137,58 MΩ	-
6	Resistência isolamento TSA - AT+M-BT	-	-	168861,92 MΩ	-
7	Resistência isolamento TSA - BT+M-AT	-	-	577120,99 MΩ	-
8	Resistência isolamento para-raios AT	-	A	232188,05 MΩ	-

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

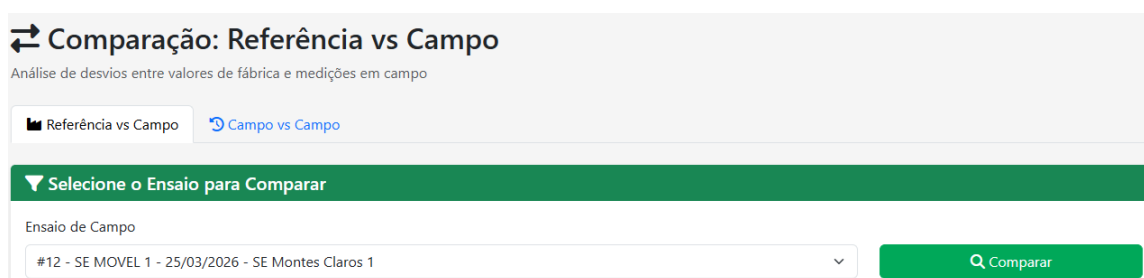
4.6 Tela de Comparação de Resultados

A tela de Comparação constitui uma das funcionalidades centrais do sistema, permitindo a análise de desvios entre valores de ensaios. A tela é organizada em duas abas distintas: “Referência vs Campo” e “Campo vs Campo”, cada uma destinada a um tipo específico de análise comparativa.

4.6.1 Comparação Referência vs Campo

A aba "Referência vs Campo", apresentada na Figura 34, permite a comparação entre os valores de ensaios obtidos em fábrica e as medições realizadas em campo para uma determinada subestação móvel. O operador seleciona o ensaio de campo desejado por meio de lista suspensa, que exibe o identificador, a SE móvel, a data e o local do ensaio, e aciona o botão "Comparar" para processar a análise.

Figura 34 – Tela para seleção de comparação com ensaios de referência



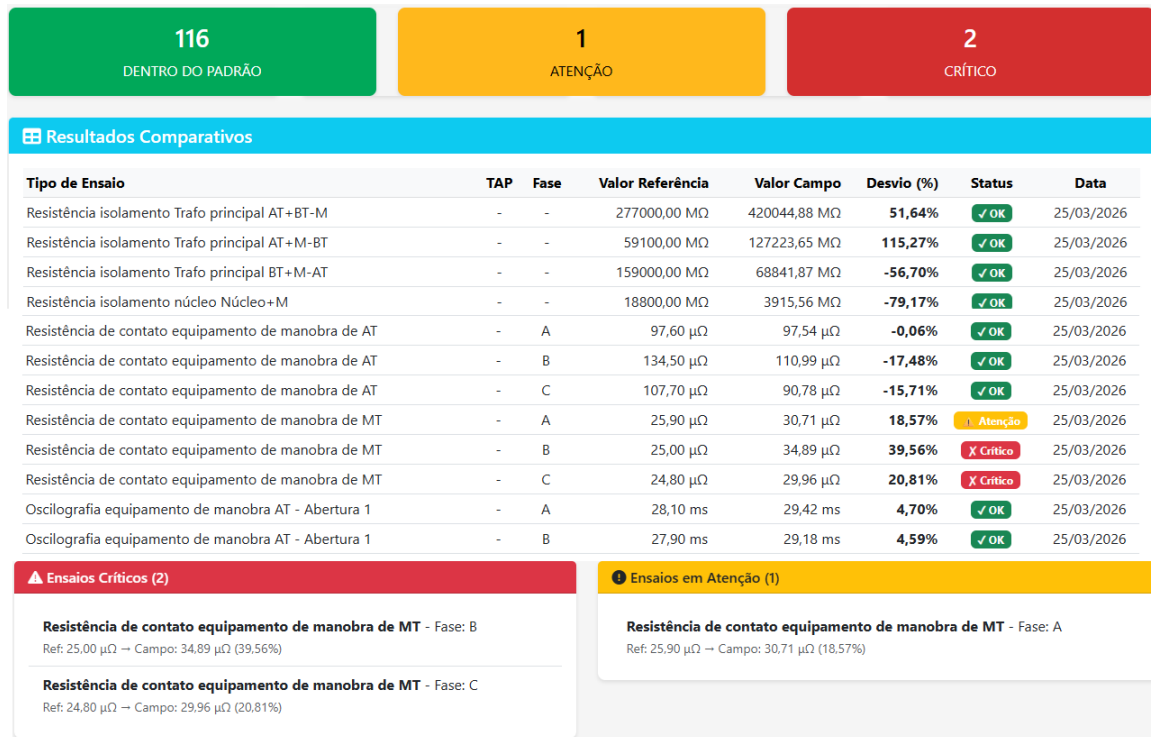
Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

Os resultados são exibidos conforme ilustrado na Figura 35. Na parte superior, três indicadores apresentam um resumo quantitativo da comparação: o número de ensaios classificados como "Dentro do Padrão", em verde; os classificados como "Atenção", em amarelo; e os classificados como "Crítico", em vermelho. No exemplo ilustrado, referente ao ensaio da SE Móvel 1 realizado em 25/03/2026 na SE Montes Claros 1, foram obtidos 116 ensaios dentro do padrão, 1 em atenção e 2 críticos.

A tabela de resultados comparativos exibe, para cada medição, o tipo de ensaio, TAP, fase, valor de referência, valor de campo, desvio percentual, status e data. O status é atribuído automaticamente pelo algoritmo de classificação descrito na seção 3.2.2.1, sendo exibido com código de cores: verde para "OK", amarelo para "Atenção" e vermelho para "Crítico", facilitando a identificação visual de não conformidades.

Ao final da tabela, dois painéis de destaque consolidam os ensaios críticos e os ensaios em atenção. No exemplo apresentado, os ensaios críticos correspondem à resistência de contato do equipamento de manobra de média tensão nas fases B e C, com desvios de 39,56% e 20,81% respectivamente em relação aos valores de fábrica, superando o limite de 20% estabelecido como critério de classificação. O ensaio em atenção corresponde à fase A do mesmo tipo de ensaio, com desvio de 18,57%, situado entre os limites de 15% e 20%.

Figura 35 – Exemplo de comparação Referência vs Campo



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

4.6.1.1 Análise Técnica dos Resultados Críticos Identificados

A funcionalidade de comparação Referência vs Campo não se limita à exibição de desvios percentuais, constituindo uma ferramenta de suporte à decisão de engenharia, uma vez que permite identificar não conformidades que demandam avaliação técnica antes da energização ou operação da subestação móvel. Para ilustrar essa capacidade, analisa-se a seguir o caso identificado no ensaio da SE Móvel 1, realizado em 25/03/2026 na SE Montes Claros 1.

Conforme apresentado na seção 2.3.4, o ensaio de resistência de contato tem por objetivo determinar a resistência ôhmica entre os polos de um disjuntor na posição fechada, sendo o aumento desse valor indicativo de degradação dos contatos, fenômeno diretamente relacionado à formação de arcos elétricos durante as operações de manobra. Os critérios de classificação adotados no sistema, baseados em especificações técnicas do fabricante, estabelecem que aumentos acima de 20% indicam condição crítica.

Antes de atribuir os desvios identificados à degradação dos contatos propriamente dita, é necessário considerar e descartar causas externas que podem elevar artificialmente os valores medidos. Entre os fatores mais comuns destacam-se a presença de sujidade ou oxidação nos terminais das buchas do disjuntor, que aumentam a resistência de contato entre os cabos de medição e o equipamento, e o uso inadequado do microhmímetro, como posicionamento incorreto das pontes ou corrente de injeção insuficiente. A verificação e limpeza dos terminais de medição,

seguida de nova leitura, constitui etapa preliminar obrigatória antes de qualquer conclusão diagnóstica. Confirmada a repetibilidade dos valores após esses cuidados, os desvios passam a ser atribuídos à condição real dos contatos internos do disjuntor.

Do ponto de vista técnico, o aumento da resistência de contato nas proporções identificadas nas fases B e C indica degradação significativa da superfície de contato, possivelmente decorrente do acúmulo de películas isolantes, oxidação ou desgaste mecânico resultante das operações de manobra e dos ciclos de transporte da subestação móvel. Conforme destacado por Souza (2015), a resistência de contato elevada provoca aquecimento localizado nos polos durante a condução de correntes de carga, podendo comprometer a capacidade de interrupção do disjuntor e reduzir sua vida útil operacional.

Diante dos valores identificados, o sistema fornece subsídio técnico para as seguintes recomendações: para as fases B e C, classificadas como Crítico, recomenda-se a não energização da subestação móvel até que seja realizada manutenção corretiva nos contatos do disjuntor de média tensão, com posterior reensaio para confirmação da conformidade; para a fase A, classificada como Atenção, recomenda-se monitoramento prioritário na próxima campanha de ensaios, com avaliação da evolução do desvio ao longo do tempo por meio da funcionalidade Campo vs Campo do sistema.

4.6.2 Comparação Campo vs Campo

A aba "Campo vs Campo", apresentada na Figura 36, complementa a funcionalidade de comparação permitindo a análise temporal da evolução dos valores medidos entre duas campanhas de ensaios distintas de uma mesma subestação móvel. O operador seleciona primeiramente a SE móvel desejada e, em seguida, define o ensaio base e o ensaio a ser comparado por meio de listas suspensas. O sistema valida automaticamente que ambos os ensaios pertencem à mesma subestação, garantindo a comparabilidade dos dados.

Figura 36 – Tela para seleção de comparação Campo vs Campo

A interface apresenta uma barra superior com duas abas: "Referência vs Campo" (ativa) e "Campo vs Campo". Abaixo, há uma barra azul com o texto "Selecione Dois Ensaios da Mesma SE para Comparar". O formulário principal contém:

- Um ícone de caminhão e o texto "Primeiro, selecione a SE Móvel".
- Uma lista suspensa com o valor selecionado "SE MOVEL 2 - FABRICANTE 2".
- Um texto de validação: "A comparação só é válida entre ensaios da mesma subestação".
- Dois campos de seleção de ensaios:
 - "Ensaio 1 (Base)": #8 - 06/09/2025 - SE Sta Rita do Sapucaí. Abaixo, em menor fonte, está "Ensaio usado como referência".
 - "Ensaio 2 (Comparar)": #9 - 30/01/2026 - SE Pouso Alegre 1. Abaixo, em menor fonte, está "Ensaio a ser comparado".
- Um botão verde no canto inferior direito com o texto "Comparar Ensaios".

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

Os resultados são apresentados conforme a Figura 37, com dois cabeçalhos lado a lado

identificando o ensaio base e o ensaio comparado, contendo respectivamente o ID, a SE móvel, a data e o local de cada campanha. A tabela comparativa exibe, para cada medição, o tipo de ensaio, TAP, fase, valor do ensaio base, valor do ensaio atual e a variação percentual entre eles. Quando um resultado apresenta melhora em relação ao ensaio base, a variação percentual é destacada em verde, ao passo que uma piora é destacada em vermelho, permitindo identificar rapidamente tendências de degradação ou evolução favorável dos equipamentos ao longo do tempo.

No exemplo ilustrado, comparam-se os ensaios da SE Móvel 2 realizados em 06/09/2025 na SE Sta Rita do Sapucaí (ensaio base) e em 30/01/2026 na SE Pouso Alegre 1 (ensaio comparado). Observa-se, por exemplo, variações nos tempos de fechamento dos polos do disjuntor de alta tensão, com aumentos de +33,19% e +30,73% nas fases B e C respectivamente, valores que merecem atenção técnica nas próximas campanhas de ensaio.

Figura 37 – Exemplo de comparação Campo vs Campo

Ensaio Base (Referência)

ID: #8

SE Móvel: SE MOVEL 2

Data: 06/09/2025

Local: SE Sta Rita do Sapucaí

Ensaio Comparado

ID: #9

SE Móvel: SE MOVEL 2

Data: 30/01/2026

Local: SE Pouso Alegre 1

Resultados Comparativos

Tipo de Ensaio	TAP	Fase	Ensaio Base (06/09/2025)	Ensaio Atual (30/01/2026)	Variação (%)
Resistência isolamento Trafo principal AT+BT-M	-	-	474847,75 MΩ	424007,68 MΩ	↓ -10,71%
Resistência isolamento Trafo principal AT+M-BT	-	-	122627,35 MΩ	125134,04 MΩ	↑ +2,04%
Resistência isolamento Trafo principal BT+M-AT	-	-	72123,35 MΩ	69342,01 MΩ	↓ -3,86%
Resistência isolamento núcleo Núcleo+M	-	-	3632,00 MΩ	4062,08 MΩ	↑ +11,84%
Oscilografia equipamento de manobra AT - Abertura 1	-	A	29,17 ms	28,42 ms	↓ -2,57%
Oscilografia equipamento de manobra AT - Abertura 1	-	B	28,56 ms	28,16 ms	↓ -1,40%
Oscilografia equipamento de manobra AT - Abertura 1	-	C	45,67 ms	44,56 ms	↓ -2,43%
Oscilografia equipamento de manobra AT - Abertura 2	-	A	29,85 ms	29,99 ms	↑ +0,47%
Oscilografia equipamento de manobra AT - Abertura 2	-	B	28,76 ms	29,09 ms	↑ +1,15%
Oscilografia equipamento de manobra AT - Abertura 2	-	C	30,50 ms	29,38 ms	↓ -3,67%
Oscilografia equipamento de manobra AT - Fechamento	-	A	78,05 ms	81,00 ms	↑ +3,78%
Oscilografia equipamento de manobra AT - Fechamento	-	B	78,39 ms	104,41 ms	↑ +33,19%
Oscilografia equipamento de manobra AT - Fechamento	-	C	82,29 ms	107,58 ms	↑ +30,73%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

4.7 Tela de Dashboard

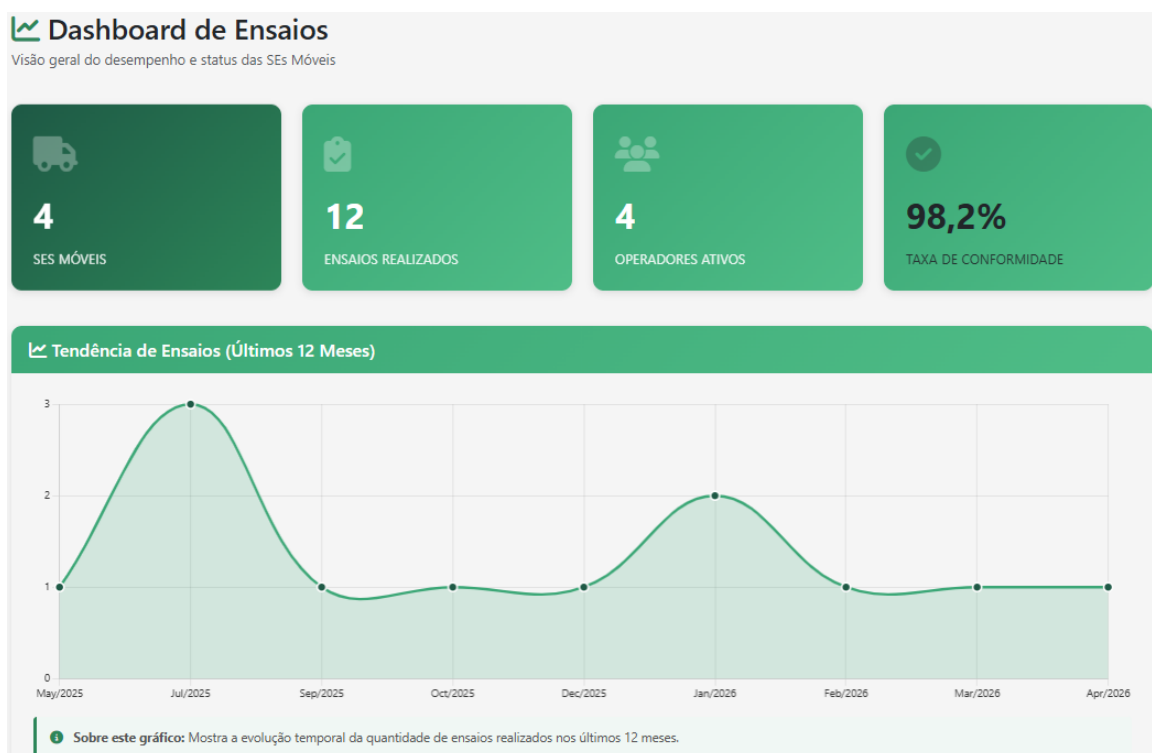
A tela de *Dashboard*, constitui o painel analítico consolidado do sistema, reunindo em uma única interface um conjunto de visualizações gráficas interativas que permitem ao gestor obter uma visão ampla e imediata do estado das subestações móveis e dos ensaios realizados.

4.7.1 Indicadores Gerais

Na parte superior do *dashboard*, apresentada na Figura 38, quatro indicadores de resumo exibem as informações mais relevantes do sistema: o número de subestações móveis cadastradas (4), a quantidade total de campanhas de ensaios realizados (12), o número de operadores ativos (4) e a taxa de conformidade geral do sistema (98,2%). Esta última é calculada automaticamente pela *view dashboard()* com base na proporção de resultados classificados como “OK” em relação ao total de medições registradas.

Abaixo dos indicadores, o gráfico de linha "Tendência de Ensaios (Últimos 12 Meses)" exibe a evolução temporal da quantidade de campanhas realizadas mês a mês no período recente. No exemplo ilustrado, observa-se um pico de 3 campanhas em julho de 2025, seguido de redução gradual e novo crescimento em janeiro de 2026, com estabilização em 1 campanha mensal nos meses subsequentes. Esse gráfico permite ao gestor identificar sazonalidades, períodos de maior demanda operacional e eventuais lacunas no cronograma de ensaios.

Figura 38 – Gráficos com Indicadores Gerais



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

4.7.2 Últimos Ensaios Críticos

A seção "Últimos Ensaios Críticos", ilustrada na Figura 39, apresenta uma tabela com os registros mais recentes classificados como críticos no sistema. Essa funcionalidade permite

que o gestor identifique rapidamente as não conformidades mais recentes sem necessidade de navegar pelas telas de comparação individualmente.

No exemplo ilustrado, os ensaios críticos mais recentes correspondem a resistências de contato do equipamento de manobra de média tensão da SE Móvel 1, com desvios de 20,8% e 39,6% nas fases C e B respectivamente, e a ensaios de oscilografia do equipamento de manobra de alta tensão da SE Móvel 2, com desvios de até 57,5% no tempo de fechamento da fase C, registrado em 06/09/2025.

Figura 39 – Tabela Últimos Ensaio Críticos

⚠ Últimos Ensaio Críticos							
SE Móvel	Tipo de Ensaio	TAP	Fase	Data	Valor Campo	Valor Ref.	Desvio
SE MOVEL 1	Resistência de contato equip...	-	C	25/03/2026	29.96	24.80	20.8%
SE MOVEL 1	Resistência de contato equip...	-	B	25/03/2026	34.89	25.00	39.6%
SE MOVEL 2	Oscilografia equipamento de ...	-	C	30/01/2026	107.58	77.90	38.1%
SE MOVEL 2	Oscilografia equipamento de ...	-	B	30/01/2026	104.41	78.10	33.7%
SE MOVEL 2	Oscilografia equipamento de ...	-	C	30/01/2026	44.56	29.00	53.7%
SE MOVEL 1	Resistência de contato equip...	-	B	04/12/2025	31.48	25.00	25.9%
SE MOVEL 2	Oscilografia equipamento de ...	-	C	06/09/2025	45.67	29.00	57.5%
SE MOVEL 1	Resistência de contato equip...	-	B	20/05/2025	33.33	25.00	33.3%

Sobre esta tabela: Lista os ensaios mais recentes com status CRÍTICO.

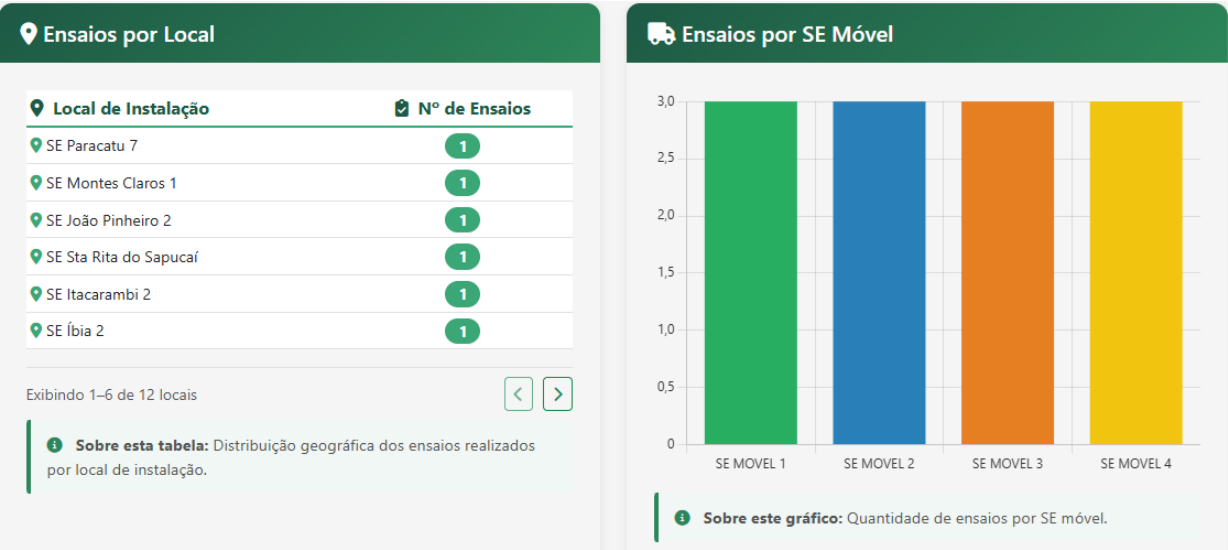
Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

4.7.3 Distribuição Geográfica e por SE Móvel

A Figura 40 apresenta duas visualizações distribuídas lado a lado. À esquerda, a tabela “Ensaio por Local” exibe a distribuição geográfica das campanhas de ensaios, listando todas as subestações fixas onde as SEs móveis foram instaladas e ensaiadas, acompanhadas da respectiva quantidade de campanhas realizadas em cada local. Os registros são ordenados de forma decrescente por quantidade. Devido ao volume de locais cadastrados, a tabela é organizada em páginas de 6 registros cada, permitindo ao usuário navegar entre elas por meio de botões de paginação.

À direita, o gráfico de barras verticais “Ensaio por SE Móvel” exibe a quantidade de campanhas realizadas por subestação, com cada SE Móvel representada por uma cor distinta.

Figura 40 – Distribuição Geográfica e por SE Móvel

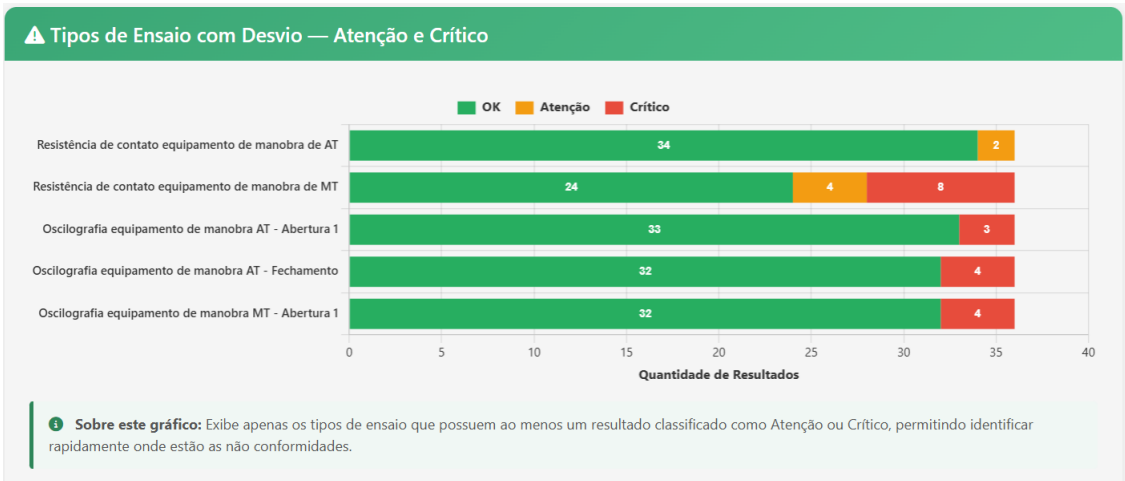


Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

4.7.4 Tipos de Ensaio com Desvio

O gráfico "Tipos de Ensaio com Desvio - Atenção e Crítico", ilustrado na Figura 41, exibe exclusivamente os tipos de ensaio que possuem ao menos um resultado classificado como Atenção ou Crítico em todo o histórico do sistema. As barras horizontais são segmentadas em três faixas, sendo verde para OK, amarelo para Atenção e vermelho para Crítico, com os valores numéricos de cada segmento exibidos dentro da própria barra, facilitando a leitura quantitativa.

Figura 41 – Tipos de Ensaio com Desvio



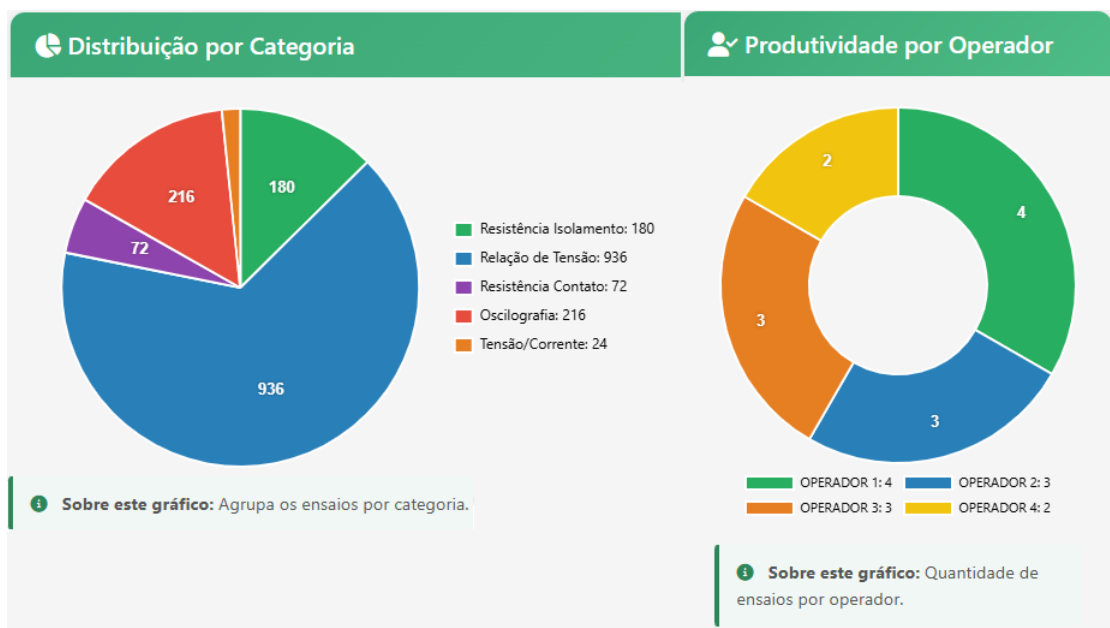
Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

4.7.5 Distribuição por Categoria e Produtividade por Operador

A Figura 42 apresenta, lado a lado, o gráfico de pizza "Distribuição por Categoria" e o gráfico de rosca "Produtividade por Operador". O gráfico de pizza agrupa os resultados de ensaios nas cinco categorias definidas no sistema: Resistência de Isolamento, Relação de Tensão, Resistência de Contato, Oscilografia e Tensão/Corrente aplicada. Os valores absolutos de cada categoria são exibidos diretamente nas fatias do gráfico e na legenda, facilitando a leitura quantitativa. No exemplo ilustrado, a categoria Relação de Tensão representa a maior fatia do total de ensaios registrados, seguida por Oscilografia e Resistência de Isolamento, refletindo a estrutura dos ensaios realizados nas subestações móveis da CEMIG.

O gráfico de "Produtividade por Operador" distribui a quantidade de campanhas realizadas por cada operador cadastrado, com as quantidades exibidas tanto nas fatias quanto na legenda.

Figura 42 – Distribuição por Categoria e Produtividade por Operador



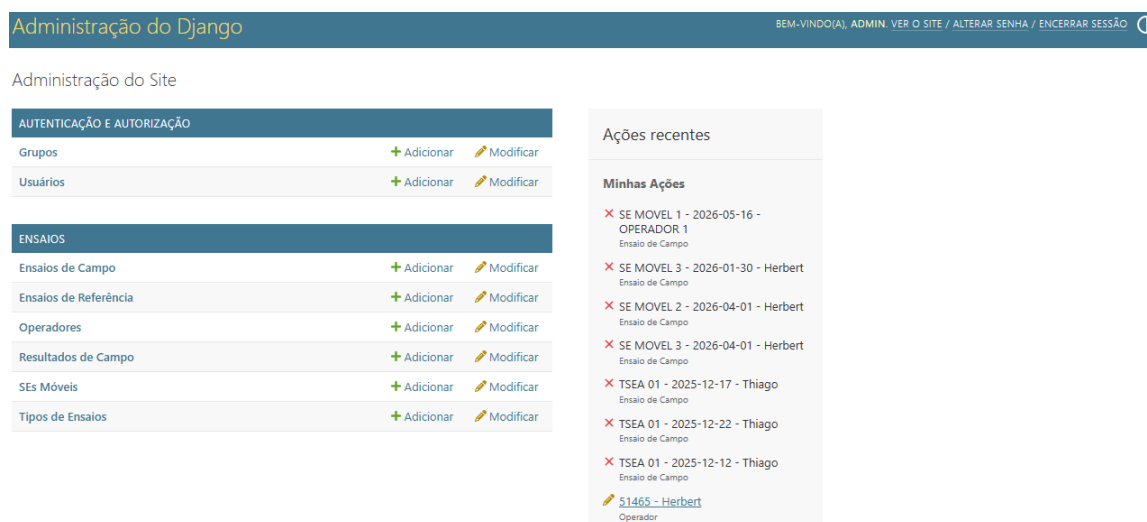
Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

4.7.6 Interface Administrativa

O sistema disponibiliza uma interface administrativa nativa do *Django*, acessível pelo endereço `/admin/`, destinada à gestão direta dos dados cadastrais por usuários com perfil de administrador. Essa interface é gerada automaticamente pelo *framework* a partir das configurações definidas no arquivo *admin.py* e oferece funcionalidades completas de criação, visualização, edição e exclusão de registros para todas as entidades da aplicação, sem necessidade de desenvolvimento de telas adicionais.

A Figura 43 ilustra a tela inicial da interface administrativa. Observa-se que as entidades estão organizadas em dois grupos distintos: "Autenticação e Autorização", que centraliza o gerenciamento de usuários e grupos de acesso do *Django*, e "Ensaaios", que reúne as seis entidades do banco de dados, sendo Ensaaios de Campo, Ensaaios de Referência, Operadores, Resultados de Campo, SEs Móveis e Tipos de Ensaaios. Para cada entidade, estão disponíveis ações de adição e modificação diretamente na tela inicial. A interface também exibe, no painel lateral direito, um histórico das ações recentes realizadas pelo administrador, permitindo rastreabilidade das operações cadastrais efetuadas no sistema.

Figura 43 – Tela inicial da interface administrativa



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

Cada entidade dispõe de uma tela de listagem tabular com recursos de pesquisa, filtros laterais e seleção múltipla para execução de ações em lote. A Figura 44 apresenta, como exemplo, a tela de listagem da entidade Operadores. Essa interface é particularmente útil para três operações administrativas fundamentais ao funcionamento do sistema: o cadastro inicial das subestações móveis com suas características técnicas, o registro em massa dos ensaios de referência provenientes dos documentos de fábrica, que no contexto deste trabalho totalizaram 476 registros distribuídos entre as quatro SEs cadastradas e o gerenciamento dos operadores autorizados a utilizar o sistema.

Figura 44 – Tela de listagem entidade Operadores

Administração do Django

BEM-VINDO(A), ADMIN. VER O SITE / ALTERAR SENHA / ENCERRAR SESSÃO

Início > Ensaios > Operadores

Comece a digitar para filtrar...

AUTENTICAÇÃO E AUTORIZAÇÃO

Grupos + Adicionar

Usuários + Adicionar

ENSAIOS

Ensaios de Campo + Adicionar

Ensaios de Referência + Adicionar

Operadores + Adicionar

Resultados de Campo + Adicionar

SEs Móveis + Adicionar

Tipos de Ensaios + Adicionar

Selecione Operador para modificar

ADICIONAR OPERADOR +

Q

Pesquisar

Ação:

 Executar 0 de 4 selecionado

☐	MATRICULA	NOME	FUNCAO
☐	60254	OPERADOR 4	Técnico de campo
☐	59527	OPERADOR 3	Técnico de campo
☐	58418	OPERADOR 2	Técnico de campo
☐	51465	OPERADOR 1	Técnico de campo

4 Operadores

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento de um sistema web para gestão de ensaios elétricos em subestações móveis, integrando conceitos de engenharia elétrica e engenharia de controle e automação. O sistema foi concebido para suprir uma lacuna identificada na gestão de ensaios em concessionárias de energia elétrica, onde o registro manual em cadernos físicos e planilhas avulsas comprometia a rastreabilidade, a segurança da informação e a capacidade analítica das equipes de operação e manutenção.

A modelagem do banco de dados relacional PostgreSQL e o desenvolvimento da aplicação web com o framework Django resultaram em uma solução funcional que atendeu integralmente aos requisitos estabelecidos, contemplando o registro estruturado de subestações móveis, operadores e campanhas de ensaios, a comparação automatizada entre valores de referência e de campo, e a geração de dashboards analíticos. Para validação do sistema, o banco de dados foi populado com informações cadastrais e valores de ensaios de referência reais provenientes de documentos internos da CEMIG, complementados por resultados de campo gerados para fins de teste, totalizando 1.428 itens de ensaio cadastrados, o que permitiu avaliar o funcionamento da aplicação em condições próximas ao ambiente real de operação.

O algoritmo de classificação automática de resultados demonstrou ser uma contribuição relevante, evidenciada na análise do ensaio de resistência de contato da SE Móvel 1, em que o sistema identificou automaticamente não conformidades e forneceu subsídio técnico concreto para a decisão de não energização do equipamento. Esse resultado demonstra que o sistema não se limita a um repositório de dados, constituindo efetivamente uma ferramenta de suporte à decisão de engenharia, alinhada às melhores práticas da engenharia moderna no que diz respeito à digitalização, rastreabilidade e suporte qualificado à tomada de decisão.

5.1 Trabalhos Futuros

Como perspectivas para trabalhos futuros, destaca-se o desenvolvimento de um aplicativo para dispositivos móveis integrado ao sistema web, com o objetivo de facilitar o registro de ensaios de campo diretamente pelos técnicos durante as campanhas, eliminando a necessidade de transcrição posterior dos dados e reduzindo o risco de erros no lançamento das informações.

Outra melhoria identificada como trabalho futuro é a vinculação da identidade de autenticação do sistema à entidade Operador, atualmente selecionada manualmente no formulário de cadastro de ensaios de campo. A documentação oficial do *Django* (Django Software Foundation, 2026a) descreve mecanismos para estender o modelo de usuário padrão, permitindo associar cada operador a uma conta de login específica e identificá-lo automaticamente a partir da sessão autenticada, eliminando a seleção manual e reforçando a confiabilidade dos registros de responsabilidade no sistema.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 5356-1: Transformadores de potência – Parte 1: Generalidades**. Rio de Janeiro, 2007. Citado na página 29.
- ANEEL. **Resolução Normativa nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021: Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica**. Brasília, 2021. Acesso em: 01/07/2026. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf>>. Citado na página 14.
- BISEN, L. S.; SINGH, D. K. Mobile transformers and mobile substations for rapidly restoring electrical service. **Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)**, v. 3, n. 8, p. 55–57, August 2016. ISSN 2349-5162. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 24.
- BRASFORMER. **Transformador de Potencial – Exterior – Mod. BPS-E**. Santiago, Chile: Edaltec Group, 2021. Transformador de potencial para instalação exterior. Disponível em: <<https://edaltec-group.com/producto/transformador-de-potencial-exterior-mod-bps-e/>>. Citado na página 19.
- CANEDO, I. R. **Banco de dados I**. Goiânia: [s.n.], 2007. Apostila. Curso de Ciências da Computação. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/slideshow/apostila-de-banco-dados/57615706>>. Citado na página 42.
- CARLETO, N. **Subestações elétricas**. 3. ed. Brasília, DF: NT Editora, 2023. 190 p. ISBN 978-65-5914-376-4. Citado na página 17.
- CEMIG. **Universo CEMIG: Plataforma de Cursos**. Belo Horizonte: [s.n.], 2024. Portal de Capacitação CEMIG. Acesso em: 17 fev. 2026. Disponível em: <<https://univercemig.cemig.com.br/>>. Citado na página 24.
- CIARLINI, E. A. **Guia prático de inspeção, manutenção e ensaios em disjuntores de alta tensão**. 71 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica)) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, julho 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/67612/3/2022_tcc_eaciarlini.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- DIGITAIS, T. S. **Transformador de Potência**. 2023. SAM Treotech: Central de Ajuda. Acesso em: 14 fev. 2026. Disponível em: <<https://sam.treotech.com.br/pt-BR/support/solutions/articles/69000841857-transformador-de-pot%C3%Aancia>>. Acesso em: 14 fev. 2026. Citado na página 18.
- Django Software Foundation. **Customizing authentication in Django**. S.l.: [s.n.], 2026. In: Django documentation, versão 6.0. Disponível em: <<https://docs.djangoproject.com/en/6.0/topics/auth/customizing/>>. Acesso em: 22 jul. 2026. Citado na página 70.
- _____. **Django at a glance**. S.l.: [s.n.], 2026. In: Django documentation, versão 6.0. Disponível em: <<https://docs.djangoproject.com/en/6.0/intro/overview/>>. Acesso em: 22 jul. 2026. Citado na página 40.
- _____. **FAQ: general**. S.l.: [s.n.], 2026. In: Django documentation, versão 6.0. Disponível em: <<https://docs.djangoproject.com/en/6.0/faq/general/>>. Acesso em: 22 jul. 2026. Citado na página 38.
- ELMASRI, R.; NAVATHE, S. B. **Fundamentals of Database Systems**. 7. ed. Boston: Pearson, 2017. ISBN 9780133970777. Citado 4 vezes nas páginas 33, 34, 35 e 36.

ENERGY, H. **Transformador de potencial EMF (52 a 145/170 kV)**. 2026. Transformador de potencial indutivo para medição e proteção. Disponível em: <<https://www.hitachienergy.com/br/pt/products-and-solutions/instrument-transformers/voltage-transformers/emf-52-170-kv>>. Citado na página 19.

Ensinando Elétrica. **Transformador de Corrente (TC)**. 2016. Blog Ensinando Elétrica. Acesso em: 17 fev. 2026. Disponível em: <<https://ensinandoeletrica.blogspot.com/2016/03/transformador-de-corrente-tc.html>>. Acesso em: 17 fev. 2026. Citado na página 20.

FILHO, J. M. **Manual de equipamentos elétricos**. 4. ed. Brasil: LTC, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 20, 22 e 23.

FLURSCHEIM, C. H. **Power Circuit Breaker Theory and Design**. 3. ed. London UK: Institution Of Engineering And Technology, 1982. Citado na página 20.

GARZON, R. D. **High Voltage Circuit Breakers: Design and Applications**. 1. ed. New York: Marcel Dekker, Inc, 1997. Citado na página 20.

GONCALVES, F. M. Diagnósticos de cabos isolados de media tensão. **Revista FT**, 2024. Disponível em: <<https://revistaft.com.br/diagnosticos-de-cabos-isolados-de-media-tensao/>>. Citado na página 28.

GROUP, L. E. **Disjuntor SF6 de alta tensão para ambientes externos série LW8-36**. 2024. Catálogo comercial de produto. Disponível em: <<https://www.lselectric.com/pt/product/lw8-36-series-outdoor-high-voltage-sf6-circuit-breaker/>>. Citado na página 21.

GROUP, P. G. D. **About PostgreSQL**. 2026. Sistema de gerenciamento de banco de dados objeto-relacional open source. Disponível em: <<https://www.postgresql.org/about/>>. Citado na página 46.

LOPEZ-ROLDAN, J.; ENNS, J.; GUILLAUME, P.; DEVRIENDT, C. Mobile substations: Application, engineering and structural dynamics. In: **IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition**. [S.l.: s.n.], 2006. p. 1–6. Citado 3 vezes nas páginas 14, 24 e 25.

MACÁRIO, C. G. d. N.; BALDO, S. M. **O modelo relacional**. Campinas, SP, 2005. 19 p. Curso MO-410 - Introdução a Banco de Dados. Disponível em: <<https://www.ic.unicamp.br/~geovane/mo410-091/Ch03-RM-Resumo.pdf>>. Citado na página 34.

Maurizio. **Chave Seccionadora Tripolar Abertura Vertical**. 2024. Maurizio: Produtos. Acesso em: 17 fev. 2026. Disponível em: <https://maurizio.com.br/produtos/79/2/24/Chave_Seccionadora_Tripolar_Abertura_Vertical>. Citado na página 22.

MCDONALD, J. D. (Ed.). **Electric Power Substations Engineering**. Third. Boca Raton, FL: CRC Press, 2016. (The Electric Power Engineering Handbook). Referência técnica abrangente sobre engenharia de subestações elétricas, cobrindo projeto, automação, operação e comissionamento. ISBN 9781439856383. Citado 4 vezes nas páginas 16, 17, 21 e 23.

Meastech. **Megôhmetro de resistência de isolamento**. 2018. Meastech: Produtos. Disponível em: <<https://meastech.com.br/megohmetro-resistencia-de-isolacao-metriso-prime10/>>. Citado na página 27.

MEDEIROS, I. M. de. **Ensaio em cabos isolados de alta tensão: normas, métodos e aplicações práticas**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica)) — Universidade Federal Rural do Semi-Árido, address = Mossoró, RN, pages = 77, url = <https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/13752>, urldate = 2026-03-18, 2025. Citado na página 29.

Mesh Engenharia. **Chaves Seccionadoras de AT**. 2022. Blog Mesh Engenharia. Acesso em: 17 fev. 2026. Disponível em: <<https://meshengenharia.com/2022/12/01/chaves-seccionadoras-de-at/>>. Citado na página 22.

MONTEIRO, P. R. D. **Introdução à Subestação e seus Principais Equipamentos**. São José dos Pinhais, PR: Seven Editora, 2023. (The Electric Power Engineering Handbook). ISBN 978-65-5917-700-4. Citado 5 vezes nas páginas 16, 17, 18, 19 e 22.

MRC Comercial. **Para-raios**. 2024. MRC Comercial: Produtos. Acesso em: 17 fev. 2026. Disponível em: <<https://mrccomercial.com.br/produtos/para-raios>>. Citado na página 23.

OLIVEIRA, A. C. de. **Ensaio de Resistência Dinâmica em Disjuntores: Análise de Sensibilidade da Corrente e da Velocidade de Abertura dos Contatos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, 2015. Citado na página 20.

PANCU ADRIAN BARABOI, M. A. C. New approach regarding the electroerosion estimation of the circuit breakers contacts. **Power System Department, Faculty of Electrical Engineering “Gh. Asachi” Technical University of Iasi**, p. 10, 2009. Citado na página 30.

PAULINO, M. E. d. C. Ensaio de resistência de isolamento e de rigidez dielétrica. **O Setor Elétrico**, São Paulo, v. 102, p. 56–61, jul 2014. Disponível em: <https://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2014/08/ed-102_Fasciculo_Cap-VII-Manutencao-de-transformadores.pdf>. Citado 3 vezes nas páginas 26, 27 e 28.

REIS, F. d. **Modelagem de dados**. 2017. Disponível em: <<https://www.bosontreinamentos.com.br/category/modelagem-de-dados/>>. Citado 3 vezes nas páginas 35, 36 e 37.

SANTIAGO, C. P.; VERAS, N. de L.; ARAGÃO, A. P. de; CARVALHO, D. A.; AMARAL, L. A. Desenvolvimento de sistemas web orientado a reuso com python, django e bootstrap. **Minicursos da ERCEMAPI**, 2020. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Cynthia-Santiago-2/publication/345018767_Desenvolvimento_de_sistemas_Web_orientado_a_reuso_com_Python_Django_e_Bootstrap/links/638e7e87095a6a777406ced9/Desenvolvimento-de-sistemas-Web-orientado-a-reuso-com-Python-Django-e-Bootstrap.pdf>. Citado na página 39.

SOUZA, R. T. de. **Diagnóstico de Contatos de Disjuntores Baseado na Resistência Dinâmica de Contato e Lógica Fuzzy**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 20, 30 e 31.

WEG. **Subestação Móvel**. 2026. Catálogo WEG. Disponível em: <https://www.weg.net/catalog/weg/AR/pt/Geracao-Transmissao-e-Distribuicao/Subestacoes/Solucoes-Moveis/Subestacao-Movel/p/MKT_WTD_MOBILE_SUBSTATION>. Acesso em: 02 fev. 2026. Citado na página 25.

ANEXO A – CÓDIGOS

Os códigos utilizados para a criação das tabelas do banco de dados e para o desenvolvimento do sistema web estão disponíveis em repositório público no GitHub, acessível pelo endereço: <https://github.com/thiago-viana-dornelas/Sistema-Gestao-Ensaio-TCC>.