

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

VANDILSON RODRIGO DO NASCIMENTO BARBOSA

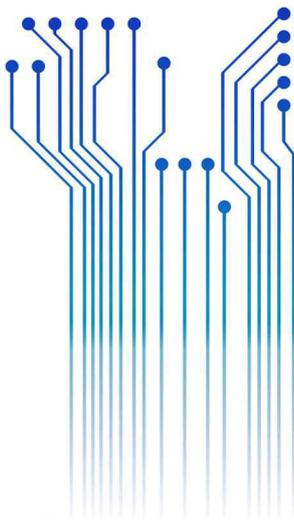


Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO
ATIVIDADES DESENVOLVIDAS DURANTE O ESTÁGIO SUPERVISIONADO NO
LABORATÓRIO DE ALTA TENSÃO – UFCG



Departamento de
Engenharia Elétrica



Campina Grande - PB
Dezembro de 2019

VANDILSON RODRIGO DO NASCIMENTO BARBOSA

ATIVIDADES DESENVOLVIDAS DURANTE O ESTÁGIO SUPERVISIONADO NO LABORATÓRIO
DE ALTA TENSÃO - UFCG

*Relatório de estágio supervisionado submetido
à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica
da Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Orientador:

Professor George Rossany Soares de Lira, D. Sc.

Campina Grande

2019

VANDILSON RODRIGO DO NASCIMENTO BARBOSA

ATIVIDADES DESENVOLVIDAS DURANTE O ESTÁGIO SUPERVISIONADO NO LABORATÓRIO
DE ALTA TENSÃO - UFCG

*Relatório de estágio supervisionado submetido
à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica
da Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Aprovado em: / /

Professor Ronimack Trajano de Souza, D. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador, UFCG

Professor George Rossany Soares de Lira, D. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho à minha mãe, Vandeilza Nascimento, que, com muito carinho e apoio, não mediu esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por estar comigo em todos os momentos desta minha longa jornada, sempre me dando forças nas horas em que pensei em desistir. Pelo dom da vida e por todas as oportunidades que Ele deu para mim.

Agradeço à minha família, em especial, à minha mãe, por todo amor, carinho, cuidado e por todo esforço para criar e educar a mim e ao meu irmão, nos proporcionando sempre o melhor que podia. Ela foi e é uma das principais motivações para buscar um futuro melhor. Ademais, minha tia, Vangeilsa Nascimento, merece também destaque, pois tenho imensa gratidão pelos sábios conselhos e apoio nos momentos mais críticos, além de ser um exemplo de sucesso que me inspira bastante. Ao meu irmão, João, e também aos meus primos, Victor Nascimento e Camila Nascimento, por me apoiarem nas minhas decisões e durante o período da graduação.

Agradeço a todos os professores do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e outras instituições, que contribuíram direta ou indiretamente para minha formação. Dentre esses professores, três deles merecem destaque: George Lira, Valdemir Brito e Edson Costa. Ao primeiro e ao segundo, por serem os meus orientados durante a graduação, em projetos de pesquisa, pela paciência, atenção, compreensão e as várias oportunidades que foram oferecidas para mim. Ao terceiro, pelo apoio, conselhos e dedicação com relação, sobretudo, aos alunos com vínculo ao Laboratório de Alta Tensão (LAT) da UFCG. Outro professor que também merece ser destacado é o professor Pablo Bezerra, o qual foi o meu supervisor durante o estágio supervisionado.

Aos colegas e amigos de curso, agradeço por todo o apoio e pelos conhecimentos compartilhados. Tenho enorme gratidão pelos que fazem o Armário, pela amizade, apoio e conversas descontraídas no dia a dia da graduação.

Agradeço aos que fazem o LAT, pela amizade, conhecimentos técnicos e outras experiências compartilhadas durante as conversas no âmbito do laboratório.

E, ainda, agradeço aos que contribuíram, de forma direta e indireta, para a realização das minhas atividades durante o estágio, com destaque para Higor Dias, Antônio Leite, Lenilson Barbosa, João Jales e Ítalo Medeiros.

“A persistência é o caminho do êxito.”

Charles Chaplin.

RESUMO

O Laboratório de Alta Tensão (LAT), pertencente à Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), é, na sua especialidade, o laboratório melhor equipado do Norte-Nordeste do país. Desse modo, é um excelente local para obter experiência na área de Engenharia Elétrica, em especial na especialidade de Eletrotécnica. As atividades desenvolvidas durante o estágio supervisionado foram realizadas nesse laboratório. O estágio ocorreu no período compreendido entre setembro e novembro de 2019. Durante o processo do estágio, foi possível participar de diversas atividades, envolvendo ensaios elétricos, confecção de relatórios, prestação de serviço para empresas do setor elétrico, prototipagem de um sistema de monitoramento de para-raios de ZnO e cursos de capacitação. Dentre os ensaios realizados, destacam-se: ensaio com equipamentos de linha viva; ensaios típicos de para-raios de Óxido de Zinco (ZnO); ensaio de envelhecimento acelerado de varistores de ZnO; e ensaios típicos de isoladores. Para solidificação do conhecimento associado a cada um dos ensaios elétricos, foram elaborados relatórios de cada um deles. Ao longo do estágio, as atividades para otimizar um sistema de monitoramento de para-raios de ZnO foram realizadas. Com relação aos ensaios de isoladores, foi realizado o acompanhamento de cada um deles. Além disso, atividades voltadas para capacitação profissional foram oferecidas pelo laboratório, tal como o curso de Norma Regulamentadora (NR) 10. E, ainda, foi possível a realização de medições de resistividade em campo, com a finalidade de construir uma malha de aterramento. Por meio dessas atividades, foi possível obter experiência prática da área de Engenharia Elétrica, tendo em vista sua contribuição para formação profissional.

Palavras-chave: sistema de monitoramento; para-raios de ZnO; isoladores; malha de aterramento; ensaios elétricos; Eletrotécnica; LAT; UFCG.

ABSTRACT

The High Voltage Laboratory (LAT, from Portuguese Laboratório de Alta Tensão), belonging to the Federal University of Campina Grande (UFCG, from Portuguese Universidade Federal de Campina Grande), is, in its specialty, the best equipped laboratory in the North-Northeast of the country. Thus, it is an excellent place to get experience in the area of Electrical Engineering, especially in the field of Electrotechnical. The activities developed during the supervised internship were performed in this laboratory. The internship took place between September and November 2019. During the internship process, it was possible to participate in various activities, involving electrical testing, reporting, provision of services to companies in the electric sector, prototyping of a Metal Oxide Surge Arrester (MOSA) monitoring system and training courses. Among the tests performed, the following stand out: testing with live line equipment; typical tests for MOSAs; accelerated aging test of MOSA; and typical insulator tests. To solidify the knowledge associated with each of the tests, reports were prepared for each of these tests. Throughout the internship, activities to optimize a MOSA monitoring system were performed, such as: tests performed in low and high voltage laboratories. Regarding the insulator tests, each one of them was monitored. In addition, activities aimed at professional training were offered by the laboratory, such as the Regulatory Norm (RN) 10 course. Moreover, it was possible to perform field measurements to construct a grounding mesh. Considering these activities, it was possible to get practical experience from the Electrical Engineering area, in view of its contribution to professional training.

Keywords: monitoring system; MOSA; insulator; grounding network; electrical tests; Electrotechnical; LAT; UFCG.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fotografia da parte externa do LAT.....	19
Figura 2 – (a) SAT pertencente ao LAT; (b) mesa de controle.....	23
Figura 3 – Fotografias do GIC. (a) arranjo experimental do GIC; (b) mesa de controle.....	24
Figura 4 – Fotografias do kit de alta tensão. (a) mesa de controle; (b) arranjo experimental.....	25
Figura 5 – Fotografias da SCN. (a) parte externa; (b) parte interna.....	26
Figura 6 – Fotografia de um disjuntor de alta tensão.....	27
Figura 7 – Fotografias do LEASE. (a) local para montagem de protótipos e estudo; (b) local para armazenamento de equipamentos, instrumentos e ferramentas.....	28
Figura 8 – Fotografias do LQEE. (a) sala de ensaios elétricos; (b) ambiente para pesquisa e estudo.....	29
Figura 9 – Fotografia do almoxarifado.....	29
Figura 10 – Fotografias dos auditórios. (a) Auditório Prof. Ricardo J. A. Loreiro; (b) Auditório Prof. S. R. Naidu.....	30
Figura 11 – Fotografias da sala de reunião do LAT.....	31
Figura 12 – Fotografia da sala de graduação.....	32
Figura 13 – Fotografia de uma das salas de pós-graduação.....	32
Figura 14 – Fotografia da sala do servidor de rede do LAT.....	32
Figura 15 – (a) diagrama do arranjo experimental para ensaio da medição de tensão referência; (b) fotografia do arranjo experimental.....	35
Figura 16 – Sinais de tensão e corrente de fuga no para-raios de ZnO, obtidos durante o ensaio de medição de tensão de referência.....	36
Figura 17 – (a) arranjo experimental; (b) fotografia do arranjo experimental.....	38
Figura 18 – Forma de onda do sinal de tensão aplicado sobre o invólucro de porcelana.....	38
Figura 19 – Circuito elétrico do GIC do LAT configurado para gerar impulsos de corrente em para-raios de ZnO com forma de onda 1,5/26 μ s.....	40
Figura 20 – Formas de onda do impulso de corrente íngreme e da respectiva tensão residual medida. ...	41
Figura 21 – Circuito elétrico do GIC do LAT configurado para gerar impulsos de corrente em para-raios de ZnO com forma de onda 8/20 μ s.....	41
Figura 22 – Formas de onda do impulso de corrente de descarga atmosférica e da respectiva tensão residual medida.....	42
Figura 23 – Circuito elétrico do GIC do LAT configurado para gerar impulsos de corrente em para-raios de ZnO com forma de onda 30/60 μ s.....	43
Figura 24 – Formas de onda do impulso de corrente de operação de manobra e da respectiva tensão residual medida.....	43
Figura 25 – Diagrama representativo do arranjo experimental utilizado no ensaio de luva isolante.....	45
Figura 26 – Fotografia do ensaio em luvas isolantes.....	45
Figura 27 – Fotografia do ensaio em capacete de segurança.....	47
Figura 28 – Diagrama representativo do arranjo experimental utilizado no ensaio de bastões de manobra.....	48
Figura 29 – Diagrama representativo do arranjo experimental utilizado no ensaio de cubas isolantes (<i>liners</i>).....	50
Figura 30 – Diagrama representativo do arranjo experimental utilizado no ensaio de lençóis isolantes.....	51
Figura 31 – Diagrama de blocos do sistema de monitoramento remoto de para-raios de ZnO.....	54
Figura 32 – (a) página de acesso; (b) gráfico da corrente de fuga total medida remotamente.....	54
Figura 33 – Fotografia do sistema de monitoramento de para-raios de ZnO desenvolvido no LAT.....	55
Figura 34 – Diagrama esquemático de funcionamento do sistema de monitoramento e diagnóstico de para-raios de ZnO desenvolvido no LAT.....	55
Figura 35 – (a) diagrama do arranjo experimental; (b) fotografia do arranjo experimental.....	56
Figura 36 – Formas de onda da corrente de fuga total provenientes do resistor <i>shunt</i> (verde) e do sistema de monitoramento desenvolvido (azul).....	57
Figura 37 – Fotografias realizadas na (a) sala de graduação e na (b) sala que armazena o servidor.....	58
Figura 38 – Planilha referente ao levantamento ao equipamentos e instrumentos pertencentes ao LAT... ..	59
Figura 39 – Fotografia da fonte de alimentação programável AC da <i>California Instruments</i> ®.....	60
Figura 40 – (a) IHM; (b) GUI.....	60
Figura 41 – fotografias no (a) SAT e (b) na SGIC.....	61

Figura 42 – (a) arranjo experimental para realização dos ensaios; (b) esquema representativo da estufa térmica.	63
Figura 43 – Curvas características obtidas por meio dos ensaios de envelhecimento acelerado de varistores de ZnO (a) para a amostra A e (b) para a amostra B.	64
Figura 44 – Esquema da constituição de uma malha de aterramento.	65
Figura 45 – Terrômetro digital 6472 da AEMC.	66
Figura 46 – Medição de resistividade com a utilização de um terrômetro.	67
Figura 47 – Divisão das linhas para medições de resistividade do solo.	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores dos elementos do GIC para gerar impulsos de corrente com formas de onda 1,5/26 μ s.	40
Tabela 2 – Valores dos elementos do GIC para gerar impulsos de corrente com formas de onda 8/20 μ s.	42
Tabela 3 – Valores dos elementos do GIC para gerar impulsos de corrente com formas de onda 30/60 μ s.	43
Tabela 4 – Valores máximos de corrente de fuga em luvas isolantes.....	46
Tabela 5 – Resultados referentes aos ensaios em luvas isolantes de borracha, classe 0 – 1 kV, considerando tensão aplicada de 5 kV (60 Hz), durante 3 min, com medição da corrente de fuga.	46
Tabela 6 – Resultados referentes aos ensaios em capacetes de segurança, classe 2 – 17 kV, considerando tensão aplicada de 20 kV (60 Hz), durante 1 min, com medição de corrente de fuga.....	48
Tabela 7 – Valores máximos de corrente fuga em hastes e tubos de fibra.	49
Tabela 8 – Resultados referentes aos ensaios nos cinco elementos do bastão de manobra, considerando tensão aplicada de 100 kV (60 Hz), durante 1 min, com medição de corrente de fuga.....	49
Tabela 9 – Resultado referente ao ensaio no <i>liner</i> , considerando tensão aplicada de 35 kV (60 Hz), durante 1 min.	50
Tabela 10 – Ensaio de tensão aplicada em lençóis isolantes.....	51
Tabela 11 – Resultados dos ensaios realizados em lençóis isolantes, da classe 0 - 1 kV, considerando tensão aplicada de 5 kV (60 Hz), durante 3 min, com medição de corrente de fuga.....	52
Tabela 12 – Resultados das medições de resistividade do solo em Petrolina-PE.....	68
Tabela 13 – Percentagem do valor médio para cada distância.....	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC – *Alternating Current*.

AT – Alta Tensão.

CLP – Controlador Lógico Programável.

EPC – Equipamento de Proteção Coletiva.

EPI – Equipamento de Proteção Individual.

GIC – Gerador de Impulso de Corrente.

GIT – Gerador de Impulso de Tensão.

GSE – Grupo de Sistemas Elétricos.

GUI – *Graphical User Interface*.

IHM – Interface Humano-Máquina.

LAT – Laboratório de Alta Tensão.

LEASE – Laboratório de Eletrônica Aplicada a Sistemas Elétricos.

LQEE – Laboratório de Qualidade de Energia Elétrica.

MCOV – *Maximum Continuous Operating Voltage*.

MRT – Sistema Monofilar com Retorno por Terra.

NR – Norma Regulamentadora.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico.

P&D – Pesquisa e Desenvolvimento.

PET – Programa de Educação Tutorial.

PIBIC – Programa Institucional de Iniciação Científica.

PIBITI – Programa Institucional de Iniciação Tecnológica.

RMS – *Root Mean Square*.

RNA – Redes Neurais Artificiais.

SAT – Salão de Alta Tensão.

SCN – Sala da Câmara de Névoa.

SKAT – Sala do Kit de Alta Tensão.

SP – Sistemas de Potência.

SPDA – Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas.

SSE – *Sum of Squared Estimate of Errors*.

SST – *Total Sum of Squares*.

STD – Sala de Testes com Disjuntores.

TC – Transformador de Corrente.

TCC – Trabalho de Conclusão de Curso.

TRT – Tensão de Reestabelecimento Transitória.

UFCG – Universidade Federal de Campina Grande.

ZnO – Óxido de Zinco.

SUMÁRIO

1	Introdução.....	16
1.1	Objetivos.....	17
1.2	Estrutura do Texto.....	18
2	Laboratório de Alta Tensão.....	19
2.1	Salão de Alta Tensão.....	22
2.2	Sala do Gerador de Impulso de Corrente.....	23
2.3	Sala de Kit de Alta Tensão.....	25
2.4	Sala da Câmara de Névoa.....	25
2.5	Sala de Testes com Disjuntores.....	26
2.6	Laboratório de Eletrônica Aplicada a Sistemas Elétricos.....	27
2.7	Laboratório de Qualidade de Energia Elétrica.....	28
2.8	Almoxarifado.....	28
2.9	Auditórios.....	29
2.10	Sala de Reunião.....	30
2.11	Sala de Graduação.....	30
2.12	Sala de Pós-graduação.....	31
2.13	Sala de Servidor de Rede.....	31
3	Atividades Realizadas.....	33
3.1	Ensaio em Para-raios de ZnO.....	33
3.1.1	Ensaio de Medição da Tensão de Referência.....	34
3.1.2	Ensaio de Tensão Suportável no Invólucro.....	36
3.1.3	Ensaio de Tensão Residual.....	38
3.2	Ensaio em Ferramentas e Equipamentos para Manutenção de Linhas Energizadas.....	44
3.2.1	Ensaio em Luvas Isolantes.....	44
3.2.2	Ensaio em Capacetes de Segurança.....	47
3.2.3	Ensaio em Bastões de Manobra.....	48
3.2.4	Ensaio em Cubas Isolantes.....	49
3.2.5	Ensaio em Lençóis Isolantes.....	50
3.3	Testes com Sistema de Monitoramento Remoto de Para-raios de ZnO.....	52
3.4	Instalação de Cabos de Rede de Internet.....	57
3.5	Levantamento de Equipamentos e Instrumentos.....	58
3.6	Ensaio com a Fonte Programável AC.....	58
3.7	Apresentação do LAT para Visitantes.....	60
3.8	Ensaio de Envelhecimento Acelerado de Para-raios de ZnO.....	61
3.9	Medição da Resistividade do Solo.....	64
3.9.1	Medição de Resistividade em Petrolina-PE.....	67
3.10	Outras atividades.....	69
4	Conclusão.....	70

Referências	72
-------------------	----

1 INTRODUÇÃO

O estágio profissional é uma importante etapa do processo de formação de um engenheiro electricista. Experiência profissional, aquisição de novos conhecimentos, viabilidade de ingresso no mercado de trabalho, decisão de carreira, habilidades práticas e aumento do *networking*. Esses são os principais benefícios ao se realizar um estágio profissional, sobretudo de nível superior. Tendo em vista isso, grande parte desses benefícios podem ser usufruídos por meio de estágio profissional em laboratório, em universidade ou instituto de pesquisa, sobretudo para um estudante de Engenharia Elétrica.

Diversas vantagens são atribuídas ao estágio profissional realizado no Laboratório de Alta Tensão (LAT), pertencente à Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Além de atuar no apoio às atividades de ensino, pesquisa e extensão da UFCG, desde sua criação em 1975, esse laboratório disponibiliza sua infraestrutura ao atendimento de demandas de outras universidades, institutos de pesquisa, indústrias, concessionárias de energia elétrica, empresas prestadoras de serviços elétricos e fabricantes de materiais e equipamentos elétricos (DEE, 2019). Isso é possível, pois esse laboratório é composto de vários equipamentos elétricos, além de explorar diversas linhas de pesquisa. Desse modo, esse laboratório possibilita que o estagiário se envolva em várias linhas de pesquisa, que estão relacionadas com geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

Dentre os ensaios possíveis para serem executados no LAT, o conjunto de ensaios elétricos em para-raios de Óxido de Zinco (ZnO) merece destaque, em virtude do grande número de exemplares de para-raios de ZnO, de distribuição e de estação, presentes no laboratório, além da infraestrutura atribuída ao laboratório. Tendo em vista que os para-raios vêm sendo largamente empregados nos Sistemas Elétricos de Potência (SEPs), o laboratório possui infraestrutura com capacidade de realizar ensaios em para-raios previstos em normas, além desses equipamentos serem utilizados para fins didáticos, na graduação e pós-graduação.

Outros ensaios relevantes, que o laboratório possui infraestrutura para realizar, são os ensaios com isoladores de alta tensão. Considerando a relevância dos isoladores para o SEP, o LAT possui também infraestrutura para realizar diversos tipos de experimentos

com isoladores, considerando os ensaios de tipo, de rotina e recebimento (DEE, 2019). Além da infraestrutura, diversas pesquisas envolvendo isoladores vêm sendo desenvolvidas no laboratório.

Além desses ensaios, no LAT, realizam-se ensaios com ferramentas e equipamentos utilizados em serviços elétricos energizados, a fim de constatar a integridade da isolação desses equipamentos ou ferramentas, para que eles sejam empregados em serviços com instalações energizadas. Por causa da importância dos ensaios em ferramentas ou equipamentos utilizados em manutenção de linhas energizadas, o laboratório possui infraestrutura suficiente para realizar esses tipos de ensaios. Exemplos desses equipamentos e ferramentas são: luvas isolantes, capacetes de segurança, bastões de manobra, cubas isolantes etc. Os ensaios mencionados anteriormente devem respeitar as normas nacionais e/ou internacionais (BORGES *et al.*, 2006).

Todos os ensaios citados, além de outros que não foram mencionados, são possíveis de serem realizados por causa da robusta infraestrutura do LAT. Nos laboratórios internos pertencente ao LAT, vários equipamentos são acessíveis, sendo os principais deles, os seguintes (DEE, 2019): gerador de impulso de tensão, gerador de impulso de corrente, fontes de alta tensão AC, detectores de descargas parciais, câmara de névoa e poluição, equipamentos voltados para o estudo de Qualidade de Energia (QEE), dentre outros. Com essa infraestrutura, muitos dos ensaios previstos em normas podem ser executados, bem como serviços que empresas de energia elétrica necessitam.

Neste relatório de estágio, apresentar-se-ão as atividades realizadas durante o estágio supervisionado, com ênfase nas seguintes atividades: ensaios elétricos executados em para-raios de ZnO e isoladores; medição de resistividade do solo; ensaios dielétricos em equipamentos e ferramentas para manutenção de linhas energizadas; testes com um protótipo de sistema de monitoramento remoto de para-raios de ZnO; dentre outras atividades. Além disso, para cada ensaio apresentado, elaborou-se um relatório técnico correspondente, considerando os equipamentos disponibilizados no LAT, com a finalidade de facilitar a replicação futura dos ensaios realizados.

1.1 OBJETIVOS

O principal objetivo do estágio é proporcionar ao aluno experiências profissionais no setor de produção, serviços ou desenvolvimento, por meio dos quais seja possível conhecer e desenvolver atividades associadas à formação de graduação em Engenharia Elétrica. Essas atividades devem, preferencialmente, estabelecer uma conexão entre os conhecimentos teóricos, adquiridos nas disciplinas de graduação, e as atividades práticas exercidas durante o estágio, previamente fundamentadas a partir de um plano de atividades, tendo como finalidade a formação sistêmica do estagiário.

Os objetivos específicos do estágio supervisionado são:

- acompanhar ensaios elétricos de alta tensão;
- estudar e executar ensaios propostos em normas técnicas;
- elaborar relatórios técnicos para realização de ensaios de alta tensão;
- realizar ensaios em para-raios de ZnO e outros equipamentos;
- participar de cursos de capacitação profissional oferecidos pelo LAT.

1.2 ESTRUTURA DO TEXTO

No capítulo 1, apresentaram-se as características do ambiente no qual foi realizado o estágio e os seus objetivos.

No capítulo 2, apresentar-se-ão as partes que constituem o LAT, com ênfase nas áreas que foram utilizadas para executar grande parte das atividades.

No capítulo 3, as atividades realizadas no LAT, durante o estágio supervisionado, serão descritas.

No capítulo 4, por fim, as conclusões obtidas por meio da participação do estágio supervisionado serão apresentadas.

2 LABORATÓRIO DE ALTA TENSÃO

A partir de 1974, o LAT, pertencente à UFCG, começou a ser implementado, por meio de uma associação de recursos nacionais com recursos de algumas cooperações técnicas internacionais. Esse laboratório é, na sua especialidade, o melhor equipado do Norte-Nordeste do país, com área construída de aproximadamente 1.050 m², dividida em vários laboratórios compostos por diversos equipamentos (DEE, 2019). Além disso o LAT possui um corpo técnico formado por docentes-pesquisadores, técnicos e discentes da pós-graduação e graduação. Apresenta-se na Figura 1 uma fotografia da parte externa do LAT.

Figura 1 – Fotografia da parte externa do LAT.



Fonte: próprio autor.

O LAT é um dos laboratórios associado ao Grupo de Sistemas Elétricos (GSE), vinculado ao Departamento de Engenharia Elétrica (DEE), da UFCG. Esse grupo é resultado da fusão de antigos grupos de pesquisa, de Sistemas de Potência (SP) e Alta Tensão (AT), ocorrido em 1999. Com essa fusão, desenvolveram-se novas linhas de pesquisa, além da consolidação e fortalecimento das linhas de pesquisa existentes. O principal objetivo do GSE é desenvolver atividades de ensino, pesquisa e extensão relacionadas à ênfase de Eletrotécnica, que é uma das ênfases do curso de graduação em Engenharia Elétrica.

Além de atuar no apoio às atividades de ensino, pesquisa e extensão da UFCG, o LAT disponibiliza sua infraestrutura ao atendimento de demandas de outras universidades

e grupos de pesquisa (nacionais e internacionais), indústrias, concessionárias de energia elétrica, empresas prestadoras de serviços elétricos e fabricantes de materiais e serviços elétricos. Devido a isso, no LAT, diversos ensaios elétricos foram realizados até então. Tendo em vista a vasta experiência e robusta infraestrutura do laboratório, inúmeras empresas têm solicitado ensaios elétricos. Algumas dessas empresas são: Ambev, Chesf, Energisa, Light, Eletro Laser, dentre outras. Dentre os serviços oferecidos pelo LAT, os principais deles, realizados em campo e laboratório, são:

- ensaios em equipamentos de potência: transformadores, disjuntores, isoladores, para-raios, religadores, cabos, cubículos de média e alta tensão, chaves etc.;
- qualidade de energia elétrica: harmônicos, *sag/swell*, transitórios, fator K, etc.;
- faturamento de energia;
- termovisão por infravermelho;
- detectores de ultravioleta (DayCor®);
- caracterização de resistividade de solos e resistências de aterramentos;
- monitoramento da qualidade de energia;
- medição de corrente de fuga de equipamentos elétricos e de potência;
- ensaios elétricos em Equipamento de Proteção Individual (EPI) e Equipamento de Proteção Coletiva (EPC).

Já os serviços voltados para estudos, consultorias, cursos, projetos e laudos são:

- geração fotovoltaica;
- aterramento industrial, de subestação e Sistemas de Proteção Contra Descargas Atmosféricas (SPDAs);
- técnicas de alta tensão;
- equipamentos elétricos;
- monitoramento de equipamentos elétricos;
- isolamento elétrico;
- qualidade de energia;

- simulações multifísicas (campos eletromagnéticos, propagação de calor etc.);
- fluxo de carga;
- transitórios eletromagnéticos (EMTP®, ATP® e RTDS®);
- proteção de sistemas elétricos;
- manobras controladas para mitigação de surtos;
- diagnósticos energéticos e eficiência energética;
- treinamento em Norma Regulamentadora (NR) 10;
- prospecção tecnológica nos temas citados.

No tocante à pesquisa, o LAT se destaca por seu pioneirismo nacional, produzindo as primeiras dissertações de mestrado e teses de doutorado nas áreas de SP e AT do Brasil, tendo contribuído para formação de centenas de engenheiros ao longo dos últimos 55 anos (DEE, 2019). Ademais, diversos projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) foram desenvolvidos em parceria com empresas do setor elétrico, proporcionando soluções para diversas demandas técnicas provenientes do setor produtivo.

Além dos programas de P&D para desenvolvimento de pesquisa, os professores-pesquisadores do laboratório desenvolvem atividades de orientação de vários alunos, por meio dos seguintes programas: doutorado, mestrado, Programa Institucional de Iniciação Científica (PIBIC), Programa Institucional de Iniciação Tecnológica (PIBITI), Programa de Educação Tutorial (PET), estágio supervisionado, Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) e projetos voluntários. Atualmente, diversas linhas de pesquisa são exploradas pelos pesquisadores do LAT, sendo as principais apresentadas a seguir:

- engenharia de alta tensão;
- geração e fontes alternativas de energia;
- monitoramento, diagnóstico e estimação de vida útil de equipamentos e sistemas;
- qualidade de energia e eficiência energética;
- modelagem, análise e simulação de sistemas elétricos;
- inteligência computacional aplicada a sistemas elétricos;
- simulações multifísicas;
- métodos probabilísticos e otimização aplicados a sistemas elétricos.

Com relação à estrutura do LAT, esse laboratório é constituído por vários equipamentos, que são empregados no ensino, pesquisa e extensão. Dentre os equipamentos existentes no laboratório, os principais são:

- Gerador de Impulso de Tensão (GIT) com capacidade de 750 kV impulsiva;
- Gerador de Impulso de Corrente (GIC) de até 118 kA;
- fontes de alta tensão AC de 600 kV e de 100 kV;
- detectores de descargas parciais, corona (DayCor®), emissão infravermelha (termovisor) e ultrassônica;
- medidores de tangentes de perdas, fator de potência e de rigidez dielétrica;
- câmara de névoa e poluição;
- equipamentos (qualímetro homologado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS) e *softwares* utilizados em estudos *smart-grids* e QEE;
- licenças de *softwares* para modelar, projetar e analisar problemas multifísicos, tal como o COMSOL Multiphysics®.

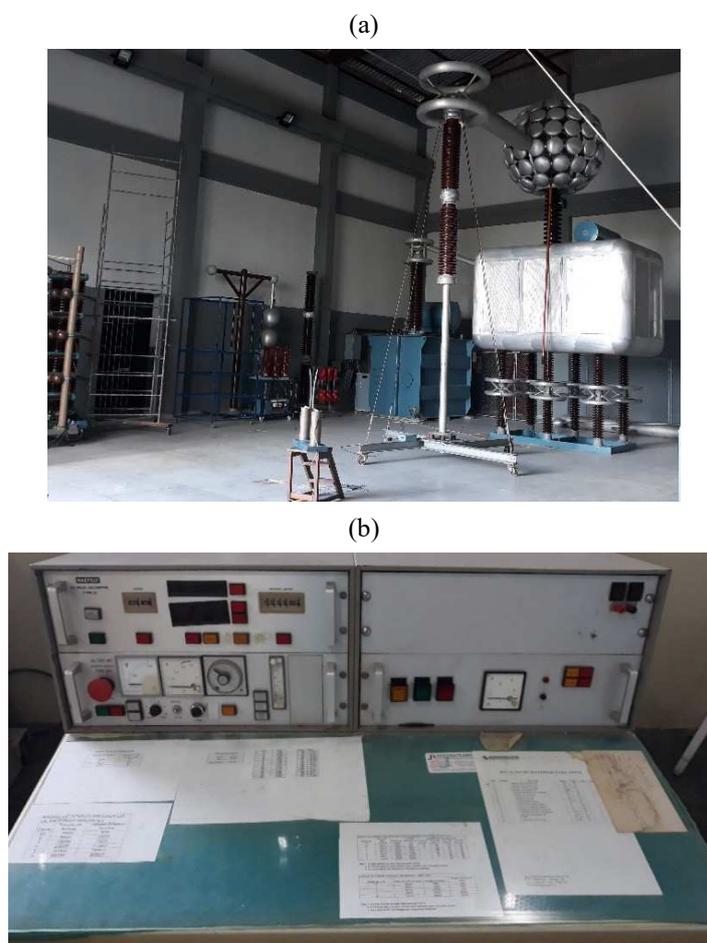
O LAT, conforme já explicitado, é composto por vários ambientes destinados para realização de ensaios. Na contemporaneidade, esses ambientes são: Salão de Alta Tensão (SAT), Sala de GIC, Sala do Kit de Alta Tensão (SKAT), Sala da Câmara de Névoa (SCN), Sala de Testes com Disjuntores (STD), Laboratório de Eletrônica Aplicada à Sistemas Elétricos (LEASE) e Laboratório de Qualidade de Energia Elétrica (LQEE). E, ainda, é importante mencionar os auditórios e sala de reunião. Além desses ambientes, o LAT é constituído pelas salas de professores-pesquisadores, de pós-graduação, de graduação e de P&D. Por fim, o LAT possui uma sala voltada apenas para abrigar o servidor do laboratório.

2.1 SALÃO DE ALTA TENSÃO

Dentre os ambientes que constituem o LAT, o SAT é o principal deles. Nesse ambiente, realizam-se os ensaios mais exigentes, tendo em vista que possui equipamentos

como transformadores de potência em cascata, que permitem a geração de até 600 kV e o gerador de impulsos de alta tensão (até 700 kV), sabendo que é por meio desses equipamentos que se realizam ensaios em transformadores, isoladores e disjuntores. A título de informação, a cascata de transformadores pode suprir tensões de até 600 kV com corrente de 1 A. Com relação às aplicações neste salão, algumas das possíveis são: ensaios de validação de modelos computacionais, ensaios de envelhecimento (e.g., com para-raios de ZnO), ensaios de descargas parciais e ensaios de verificação de isolamento em equipamentos de linha viva (e.g., *liner*, bastão de manobra etc.). Apresenta-se na Figura 2 uma fotografia do SAT.

Figura 2 – (a) SAT pertencente ao LAT; (b) mesa de controle.

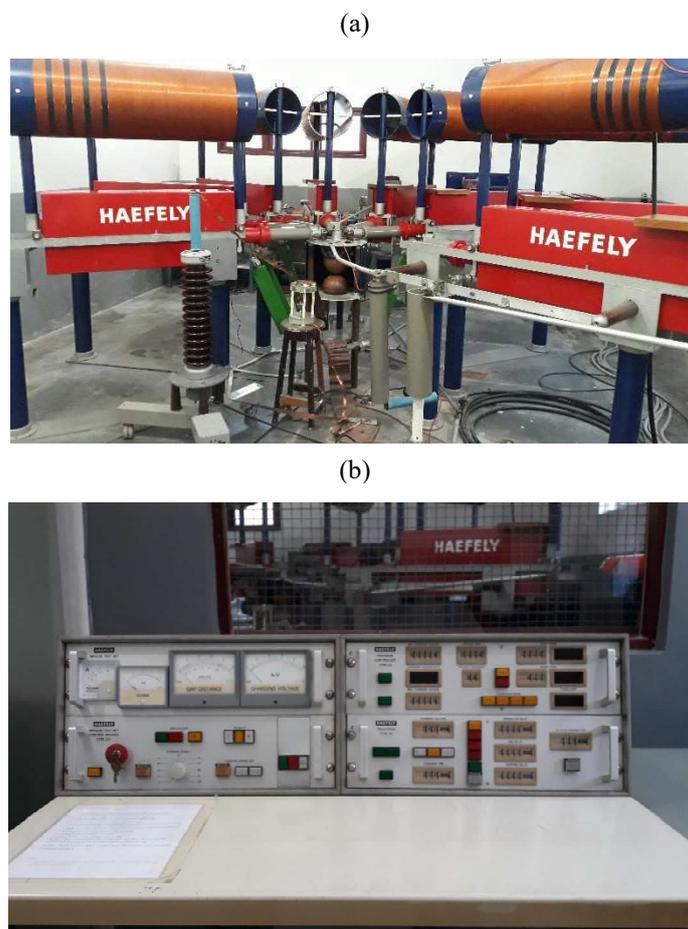


Fonte: próprio autor.

2.2 SALA DO GERADOR DE IMPULSO DE CORRENTE

O GIC (80 kJ/100 kV), fabricado pela empresa Haefely®, possui capacidade de gerar impulso de corrente de até 118 kA, embora na prática esse valor seja inferior, devido às características do objeto de teste. Esse gerador possui oito estágios, em que cada estágio é formado por um capacitor de 2 μ F (100 kV) em série com um resistor. Os estágios podem ser interligados em paralelo, de forma a aumentar a energia liberada no impulso de corrente. Uma fonte de alimentação alternada com tensão regulável entre 0 e 220 V, acoplada a um transformador de alta tensão é capaz de elevar a tensão de pico do secundário até 100 kV. A função da fonte de alimentação é carregar os capacitores. A tensão de carregamento é ajustada por meio da mesa de controle do GIC. Apresentam-se na Figura 3 fotografias da sala do GIC, com ênfase no arranjo experimental montado e sua mesa de controle, que são apresentados nas Figuras 3-(a) e 3-(b), respectivamente.

Figura 3 – Fotografias do GIC. (a) arranjo experimental do GIC; (b) mesa de controle.



Fonte: próprio autor.

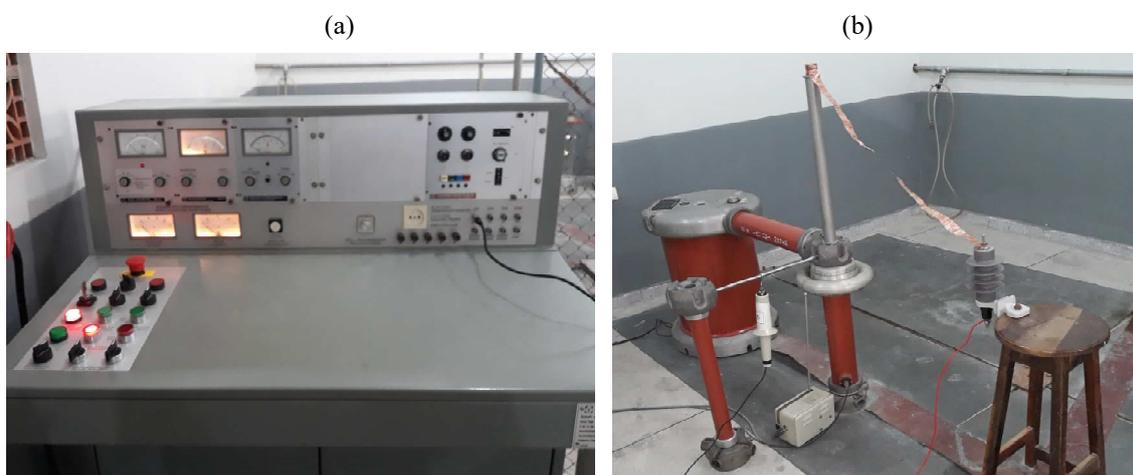
No tocante à aplicação, o GIC é empregado em algumas disciplinas de graduação, como, por exemplo, o laboratório de Equipamentos Elétricos, a disciplina de Técnicas de Alta Tensão, bem como auxilia na realização de ensaios elétricos executados por alunos

da pós-graduação e da graduação com vínculo a projetos de pesquisa. Ademais, o GIC também é empregado para prestação de serviços para terceiros, simulando impulsos de corrente íngreme, de descarga atmosférica e de operação de manobra.

2.3 SALA DE KIT DE ALTA TENSÃO

A SKAT possui como equipamento principal o kit de alta tensão, que é composto de uma mesa de controle, a qual é vinculada a um transformador que pode atingir, considerando o valor de pico, até 100 kV no secundário, capacitores de alta tensão, resistores de alta tensão, espinterômetros, tubos para descargas em gases ou vácuo, dentre outros elementos. Esse kit é indicado para ensaios elétricos que necessitam de uma faixa de tensão de 0 a 100 kV, tais como ensaios de suportabilidade de cadeias de isoladores, ensaios típicos com para-raios de ZnO etc. Uma característica positiva é a sua dimensão física, que é compacta, o que facilita a execução dos experimentos. Apresentam-se, na Figura 4, fotografias do kit de alta tensão, durante um ensaio com para-raios de ZnO.

Figura 4 – Fotografias do kit de alta tensão. (a) mesa de controle; (b) arranjo experimental.



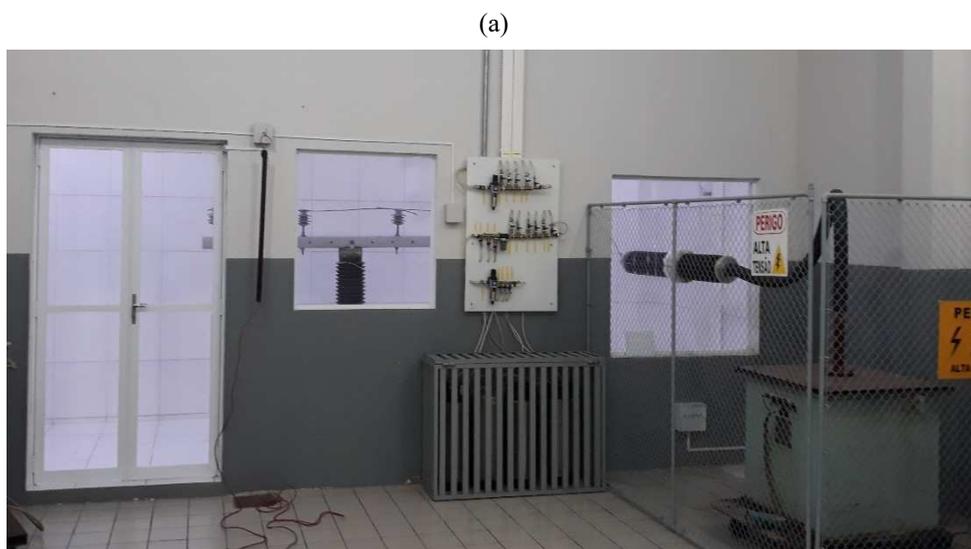
Fonte: próprio autor.

2.4 SALA DA CÂMARA DE NÉVOA

A SCN é um ambiente voltado para simular as mais diversas condições ambientais que os equipamentos e dispositivos que são empregados nos SEPs estão passíveis. Esse tipo de ambiente é empregado para realizar, sobretudo, ensaio de poluição superficial utilizando névoa salina. No tocante à utilidade, esse ambiente é bastante útil para as

pesquisas desenvolvidas pelos discentes da pós-graduação, que trabalham com isoladores e para-raios, por exemplo. É importante frisar que na câmara é possível realizar o ensaio elétrico, antes, durante ou após a poluição superficial sobre o equipamento ou dispositivo. Apresentam-se na Figura 5 algumas fotografias da SCN.

Figura 5 – Fotografias da SCN. (a) parte externa; (b) parte interna.



Fonte: próprio autor.

2.5 SALA DE TESTES EM DISJUNTORES

A STD é composta de disjuntores para realização de ensaios elétricos. Os disjuntores são equipamentos elétricos de manobra, que possuem como objetivo

estabelecer, conduzir, interromper e suportar correntes elétricas sob sua tensão máxima de rede nas condições normais de serviço (e.g., para conectar ou desligar uma linha em uma rede elétrica) e nas condições anormais especificadas (em especial para atuar diante de um curto-circuito ou as consequências de uma descarga atmosférica) (MOORE, 2004). Esse ambiente é empregado em algumas disciplinas da graduação, tal como no laboratório de Equipamentos Elétricos, como também na realização de ensaios elétricos por parte dos alunos de pós-graduação. Apresenta-se na Figura 6 um exemplar de um disjuntor presente na sala de testes.

Figura 6 – Fotografia de um disjuntor de alta tensão.



Fonte: próprio autor.

2.6 LABORATÓRIO DE ELETRÔNICA APLICADA A SISTEMAS ELÉTRICOS

O LEASE é o único laboratório, do LAT, voltado para o desenvolvimento de projetos/protótipos que necessitam de equipamentos e dispositivos de instrumentação eletrônica para o seu desenvolvimento. Esse laboratório é constituído por vários equipamentos e instrumentos de medição, sendo os principais: osciloscópios digitais; gerador de função; multímetros; fontes de tensão (contínua e alternada); Controlador Lógico Programável (CLP); etc. E, ainda, esse ambiente é constituído de vários tipos de ferramentas e componentes eletrônicos, para fins de consumo durante o desenvolvimento de projetos. Ademias, é também um lugar para auxiliar o desenvolvimento de projetos de alunos da graduação. Apresenta-se, na Figura 7, fotografias do LEASE.

Figura 7 – Fotografias do LEASE. (a) local para montagem de protótipos e estudo; (b) local para armazenamento de equipamentos, instrumentos e ferramentas.



Fonte: próprio autor.

2.7 LABORATÓRIO DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

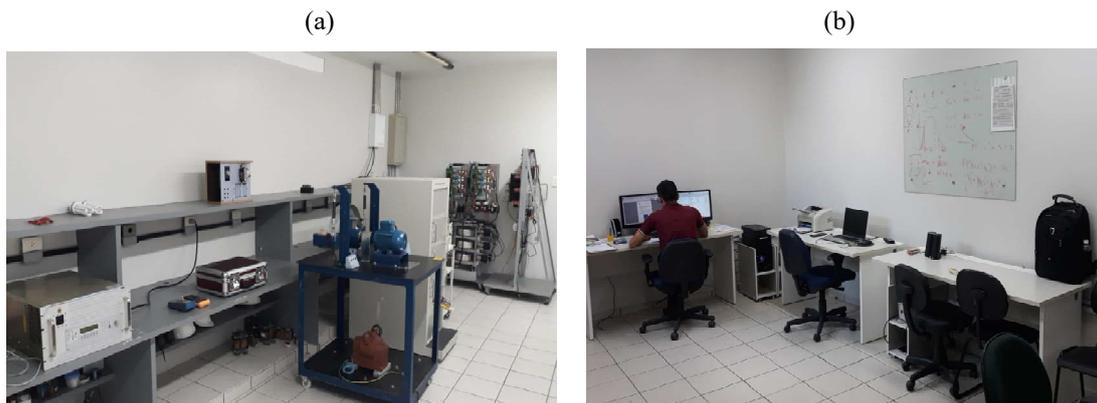
O LQEE é um ambiente destinado para desenvolvimento de pesquisa e aulas de disciplinas da graduação. Nesse laboratório existem vários equipamentos e instrumentos destinados para averiguar grandezas elétricas que auxiliem na avaliação da qualidade de energia elétrica. Alguns deles, que podem ser destacados, são: qualímetros, multímetros, motores trifásicos, inversores de frequência, banco de cargas de capacitores etc. Além desses, existem vários tipos de ferramentas e computadores de bancada, para auxiliar no desenvolvimento de pesquisa e prestação de serviços para terceiros. O principal tipo de atividade realizada no LQEE é o diagnóstico energético. Apresenta-se na Figura 8 fotografias do LQEE.

2.8 ALMOXARIFADO

O almoxarifado é um lugar destinado à estocagem em condições adequadas de produtos para uso interno e externo, a depender do serviço realizado. Esse ambiente é um importante setor do LAT, haja vista que esse recinto é o local de armazenamento de diversos equipamentos, instrumentos e componentes eletrônicos, sabendo que eles são geralmente empregados nos ensaios elétricos realizados durante algumas disciplinas da graduação e pelos os integrantes da pós-graduação. Exemplos de itens guardados no

almoxarifado são: osciloscópios, multímetros, kit de alta tensão móvel, EPIs, EPCs, ferramentas etc. Devido à importância do almoxarifado para o laboratório, esse recinto exige o controle do estoque, mercadorias e produtos, aquisição e outras tarefas, geralmente realizadas pelo estoquista ou almoxarife. Apresenta-se na Figura 9 fotografia do almoxarifado.

Figura 8 – Fotografias do LQEE. (a) sala de ensaios elétricos; (b) ambiente para pesquisa e estudo.



Fonte: próprio autor.

Figura 9 – Fotografia do almoxarifado.



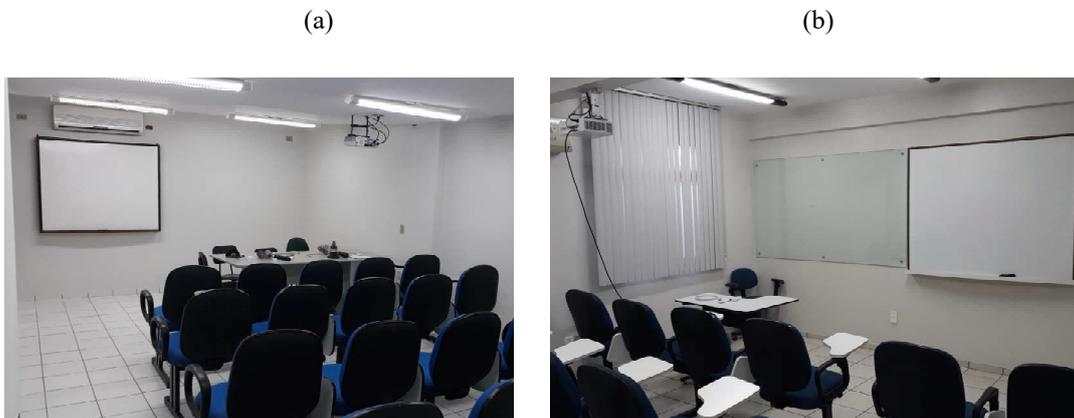
Fonte: próprio autor.

2.9 AUDITÓRIOS

Os auditórios são ambientes destinados para diversas atividades, sobretudo para transmissão de conhecimentos, tais como conferência, um debate ou um comício político. No LAT, existem dois auditórios, um titulado como Auditório Prof. Ricardo J. A. Loreiro e o outro como Auditório Prof. S. R. Naidu, que geralmente são empregados para

ministrar aulas para os discentes da graduação e pós-graduação. Além disso, esses auditórios também são utilizados para realizar apresentações de trabalhos acadêmicos, tais como: defesas de TCC, dissertação de mestrado e tese de doutorado. Apresentam-se, na Figura 10, fotografias dos auditórios.

Figura 10 – Fotografias dos auditórios. (a) Auditório Prof. Ricardo J. A. Loreiro; (b) Auditório Prof. S. R. Naidu.



Fonte: próprio autor.

2.10 SALA DE REUNIÃO

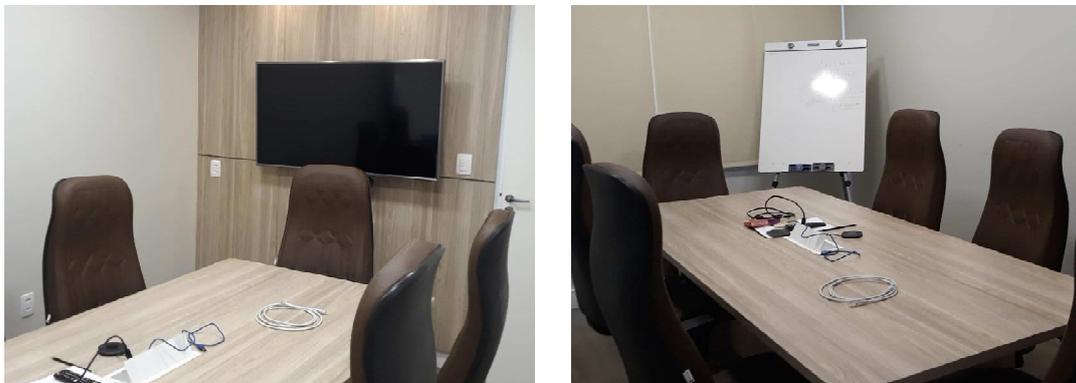
A sala de reunião é um espaço destinado para realização de reuniões, geralmente entre os próprios professores-pesquisadores do LAT, bem como entre os professores e visitantes, estes sendo geralmente professores de outras universidades ou representantes de empresas. Apresenta-se na Figura 11 uma fotografia da sala de reunião do LAT. Conforme apresentado nessa figura, verifica-se que o ambiente é diferenciado, tendo em vista a arquitetura destinada para acomodar reuniões com longo período de duração.

2.11 SALA DE GRADUAÇÃO

A sala de graduação é um espaço destinado para os alunos de graduação em Engenharia Elétrica, com vínculo ao LAT. Nesse ambiente, os alunos desenvolvem projetos de pesquisa, seja com vínculo a algum programa institucional ou P&D. A sala de graduação é constituída por vários computadores com diversos *softwares* instalados, para que os alunos possam realizar implementações computacionais das mais diversas

possíveis, de acordo com o grau de complexidade do projeto de pesquisa. Apresenta-se, na Figura 12, uma fotografia da sala de graduação.

Figura 11 – Fotografias da sala de reunião do LAT.



Fonte: próprio autor.

2.12 SALA DE PÓS-GRADUAÇÃO

A sala da pós-graduação é um recinto destinado para os discentes da pós-graduação, considerando os programas de mestrado e doutorado. Nesse ambiente, os alunos desenvolvem pesquisas referentes aos temas da dissertação, para mestrado, e tese, para doutorado. Na sala da pós-graduação existem vários computadores e *notebooks*, sendo todos eles com alta capacidade de processamento, a fim de que os alunos de pós-graduação possam desempenhar suas atividades. Essas atividades envolvem simulações computacionais, elaboração de relatórios, confecção de artigos acadêmicos etc. Apresenta-se na Figura 13 uma fotografia da sala de pós-graduação.

2.13 SALA DE SERVIDOR DE REDE

Outra sala relevante no LAT é o ambiente responsável por armazenar o servidor da rede de computadores do laboratório. Esse servidor é responsável por fornecer os serviços à rede de computadores do laboratório. Todos os pacotes destinados à *internet* ou recebidos pela *internet* passam pelo servidor. Apresenta-se, na Figura 14, a sala que armazena o servidor da rede de computadores do LAT.

Figura 12 - Fotografia da sala de graduação.



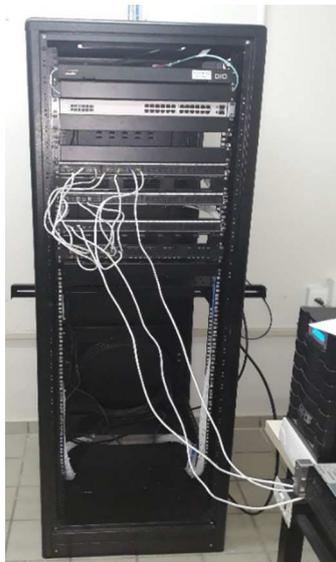
Fonte: próprio autor.

Figura 13 – Fotografia de uma das salas de pós-graduação.



Fonte: próprio autor.

Figura 14 – Fotografia da sala do servidor de rede do LAT.



Fonte: próprio autor.

3 ATIVIDADES REALIZADAS

Ao longo do estágio foram realizados vários tipos de atividades. Todas as atividades foram acompanhadas por professores, alunos da pós-graduação ou técnicos do LAT. As principais atividades desenvolvidas foram: ensaio em para-raios de ZnO; ensaios em ferramentas e equipamentos para manutenção de linhas energizadas; testes com sistema de monitoramento remoto de para-raios de ZnO; instalação de cabos de rede; levantamento de equipamentos e instrumentos; ensaios com fonte programável AC; ensaio de envelhecimento acelerado de para-raios de ZnO; medição da resistividade do solo; dentre outras atividades.

3.1 ENSAIO EM PARA-RAIOS DE ZNO

Os para-raios de ZnO têm sido largamente utilizados nos SEPs, para garantir a segurança dos equipamentos elétricos contra sobretensões de origem externa (descargas atmosféricas) ou interna (operações de manobra) que incidem ou se propagam em subestações ou linhas de transmissão (BARGIGIA *et al.*, 1986; GUPTA, 1990). Esses dispositivos de proteção são importantes, uma vez que eles são empregados para evitar que o nível de tensão de operação de outros equipamentos dos SEPs não ultrapasse a tensão máxima de operação de cada um deles.

Devido à importância dos para-raios para os SEPs e ao fato de que os para-raios, ao serem instalados, estarão submetidos durante a sua vida útil a condições climáticas e a fenômenos adversos ao seu princípio de funcionamento, faz-se necessário a realização de ensaios elétricos nesses equipamentos. Esses ensaios têm como objetivo simular, em laboratório, os fenômenos que possam vir a ocorrer nos sistemas elétricos, como também verificar se o projeto do para-raios satisfaz às condições mínimas exigidas, para que seja garantida a proteção adequada aos equipamentos e sistemas elétricos, considerando os limites da classe dos para-raios.

Os ensaios que envolvem para-raios sem centelhadores são classificados em ensaios de tipo, ensaios de rotina e ensaios de recebimento. Os ensaios de tipo são ensaios realizados em corpos de prova específicos para cada ensaio, montados com componentes

normais de fabricação, que têm por objetivo verificar as características de projeto do para-raios e a conformidade do mesmo com as normas técnicas aplicadas. Já os ensaios de rotina são realizados em cada elemento do para-raios, ou para-raios completo, com o intuito de verificar as características mínimas de qualidade e uniformidade de produção em conformidade com o projeto. Por fim, os ensaios de recebimento também são realizados em cada elemento do para-raios, ou para-raios completo, na presença do seu comprador ou seu representante, com a finalidade de verificar a conformidade dos resultados obtidos com os garantidos pelo fabricante.

Dentre os tipos de ensaios mencionados, durante o estágio, realizaram-se alguns ensaios de tipo com para-raios de ZnO, alguns deles com para-raios completos e outros com parcelas representativas de para-raios (varistores). O objetivo de realizar esses ensaios consiste na obtenção de experiência com os ensaios envolvendo para-raios de ZnO propostos em normas, nacionais e internacionais, bem como confeccionar relatórios correspondentes aos ensaios, para utilização por parte de alunos da graduação, pós-graduação e professores-pesquisadores, em atividades futuras. Os ensaios de tipo realizados foram: ensaio de medição da tensão de referência, ensaio de tensão suportável no invólucro e ensaio de tensão residual.

3.1.1 ENSAIO DE MEDIÇÃO DA TENSÃO DE REFERÊNCIA

A tensão de referência consiste no valor de crista (pico) dividido pela raiz quadrada de dois, que é a tensão à frequência industrial medida entre os terminais de um para-raios, quando através dele flui uma corrente de referência (NBR 16050, 2014; IEC 60099-4, 2014). É importante frisar que a tensão de referência de uma parcela representativa de um para-raios é a soma das tensões de referência das parcelas individuais. A realização dessa medição é necessária para a escolha correta das amostras para os ensaios de ciclo de operação e descargas de linha de transmissão.

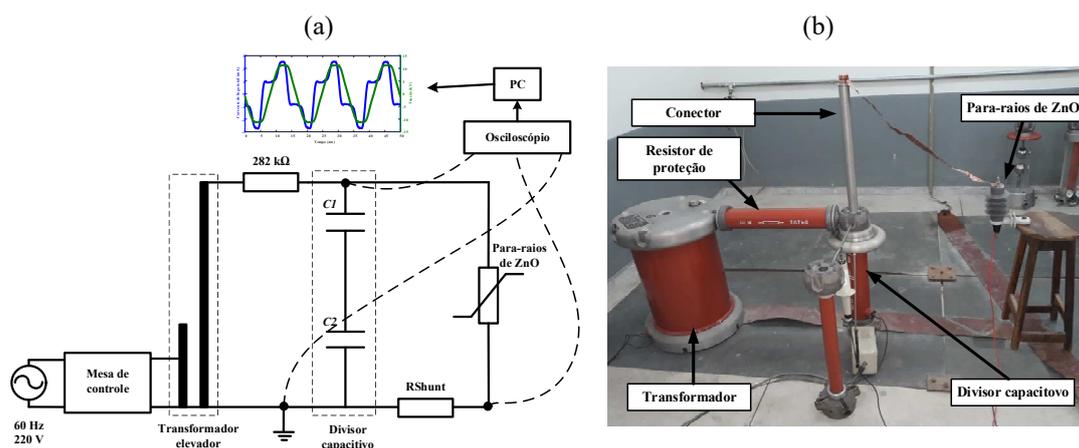
Com relação à corrente de referência, essa corrente reside no valor eficaz da corrente à frequência industrial, que é empregada para determinação da tensão de referência do para-raios. Em geral, o valor dessa corrente é especificado pelo fabricante e também caracterizado por ser um valor suficientemente elevado para tornar desprezíveis os efeitos das capacitâncias na tensão de referência medida nas unidades do para-raios. O valor da corrente de referência pode variar entre 1 mA a 20 mA, considerando o para-

raios de coluna única, dependendo da corrente de descarga nominal e/ou da classe de descarga de linha do dispositivo (NBR 16050, 2014; IEC 60099-4, 2014).

Para medição da tensão de referência, fez-se necessário a aquisição dos sinais da tensão aplicada sobre o para-raios de ZnO e a corrente de fuga total que ele conduz. Para a realização do ensaio de medição da tensão de referência, foram realizadas medições de tensão correspondente ao valor da corrente de referência, que foi adotada como 1 mA. Como objeto de teste, utilizou-se um para-raios de ZnO com encapsulamento de material polimérico, cuja Máxima Tensão de Operação Contínua (MCOV, do inglês *Maximum Continuous Operating Voltage*) é de 10,2 kV (*Root Mean Square – RMS*).

Para a realização dos ensaios no LAT, empregou-se o diagrama esquemático do arranjo experimental apresentado na Figura 15-(a). O circuito é composto por uma mesa de controle, um transformador de tensão (0 a 100 kV, valor de pico), um resistor de proteção (282 kΩ), um divisor capacitivo, o objeto de teste (para-raios de ZnO) em série com um resistor *shunt* (R_{shunt}) e um osciloscópio digital. A fim de medir a tensão aplicada sobre o para-raios, utilizou-se uma ponta de prova de alta tensão. De forma indireta, é empregado o resistor *shunt* para obter o sinal da corrente de fuga total por meio da aquisição do sinal de tensão aplicado sobre o mesmo. Apresenta-se na Figura 15-(b) uma fotografia do arranjo experimental.

Figura 15 – (a) diagrama do arranjo experimental para ensaio da medição de tensão referência; (b) fotografia do arranjo experimental.



Fonte: próprio autor.

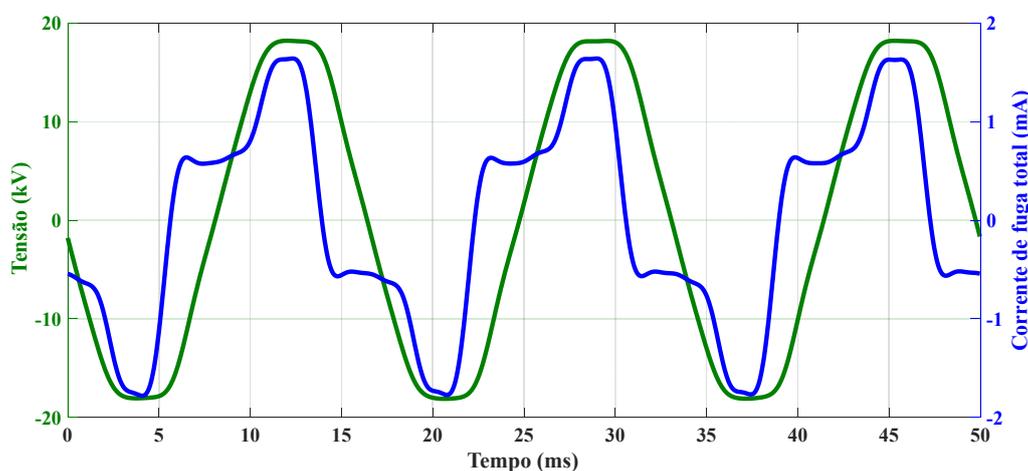
Os resultados obtidos por meio do ensaio elétrico realizado com base no arranjo experimental apresentado na Figura 15-(a), apresentam-se na Figura 16 os sinais de tensão aplicada sobre o para-raios e da sua corrente de fuga total. Embora na Figura 16 sejam apresentados apenas os sinais da tensão e corrente, os valores eficazes desses sinais

também foram registrados. Assim, para a corrente de referência de 1 mA, foi obtida a tensão de referência de 13,65 kV. Durante o ensaio, verificou-se que o valor da corrente de fuga passou a crescer de forma não linear, após ser ultrapassado o valor da MCOV, caracterizando a região de alta não linearidade da curva característica $V - I$ do para-raios de ZnO.

3.1.2 ENSAIO DE TENSÃO SUPORTÁVEL NO INVÓLUCRO

O para-raios de ZnO é constituído de vários elementos estruturais. Dentre esses elementos, destaca-se o invólucro, que pode ser de porcelana ou material polimérico. Esse elemento garante o bom funcionamento do para-raios, visto que é utilizado para dificultar a infiltração de substâncias e o acúmulo de sujeira proveniente da poluição (HINRICHSEN, 2012). Devido à importância desse elemento para o funcionamento correto do para-raios, ensaios elétricos foram realizados para verificar a capacidade dos invólucros de suportarem as solicitações dielétricas em ar. Com a finalidade de simular condições verossímeis à realidade, as normas recomendam ensaio sob chuva, quando o para-raios é de uso interno, e ensaio a seco, quando o para-raios é de uso externo.

Figura 16 – Sinais de tensão e corrente de fuga no para-raios de ZnO, obtidos durante o ensaio de medição de tensão de referência.



Fonte: próprio autor.

Para realização do ensaio, recomenda-se o ensaio de tensão suportável do invólucro com um corpo de prova constituído do para-raios completo, sem a parte interna ativa (coluna de varistores). As superfícies externas das partes isolantes devem ser cuidadosamente limpas. E, ainda, o corpo de prova deve ser montado de modo a melhor

reproduzir as condições de instalação em campo, atentando para as distintas formas de instalação de para-raios de distribuição e tipo estação.

Existem três tipos de ensaios de tensão suportável no invólucro: ensaio de tensão suportável de impulso atmosférico; ensaio de tensão suportável de impulso de manobra; e ensaio de tensão suportável à frequência industrial. Dentre esses ensaios, realizou-se apenas o último, em virtude da limitação do GIT do LAT. Por isso, o ensaio de tensão suportável à frequência industrial será descrito com mais detalhes.

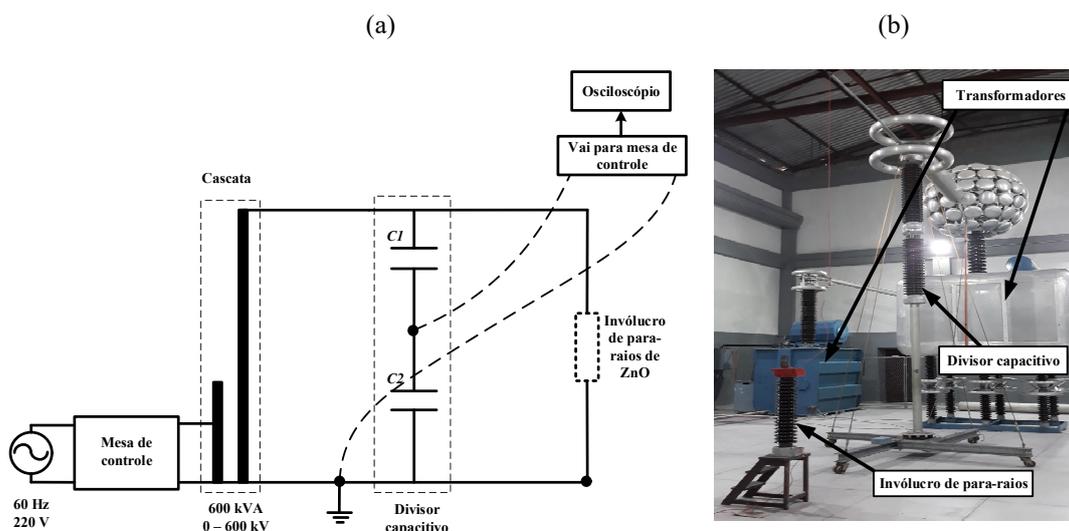
Para o ensaio de tensão suportável de impulso atmosférico, recomenda-se que o corpo de prova deve ser submetido a tensões de impulso atmosférico. Nesse ensaio, aplica-se quinze impulsos consecutivos de cada polaridade (positiva e negativa) e com a forma normalizada 1,2/50 μ s. O invólucro é considerado aprovado se não ocorrer descarga disruptiva interna e se o número de descargas disruptivas externas não exceder dois para cada série de quinze impulsos. Com relação ao nível de tensão de ensaio, esse nível deve ser igual ao nível de proteção do para-raios a impulso atmosférico, multiplicado pelo fator 1,3.

No tocante ao ensaio de tensão suportável de impulso de manobra, deve-se aplicar quinze impulsos consecutivos no valor de tensão de ensaio para cada polaridade (positiva e negativa). O invólucro é considerado aprovado se não ocorrer descarga disruptiva interna e se o número de descargas disruptivas externas não exceder dois para cada série de quinze impulsos. Para configuração do nível de tensão, o valor da tensão de ensaio deve ser igual ao nível de proteção do para-raios a impulso de manobra, multiplicado pelo fator 1,25.

Para a realização do ensaio de tensão suportável à frequência industrial, existem dois critérios para determinação do nível de tensão a ser aplicado. Nos para-raios de 5 kA, o valor de crista da tensão de ensaio, aplicado durante 60 s, deve ser igual ao nível de proteção a impulso atmosférico, multiplicado por 0,88. Já nos para-raios de 10 kA e 20 kA, o valor de crista da tensão, aplicado durante 60 s, deve ser igual ao nível de proteção a impulso de manobra, multiplicado por 1,06.

Dentre esses ensaios, realizou-se o ensaio de tensão suportável à frequência industrial. O objeto de teste foi um para-raios de ZnO, com invólucro de porcelana, tipo estação. A MCOV desse para-raios é de 42 kV e a tensão do nível de proteção, em valor de pico, é de 180 kV. Para realizar esse ensaio, utilizou-se o SAT, para empregar o transformador em cascata. O arranjo experimental empregado para o ensaio é apresentado na Figura 17-(a) e é apresentada uma fotografia na Figura 17-(b).

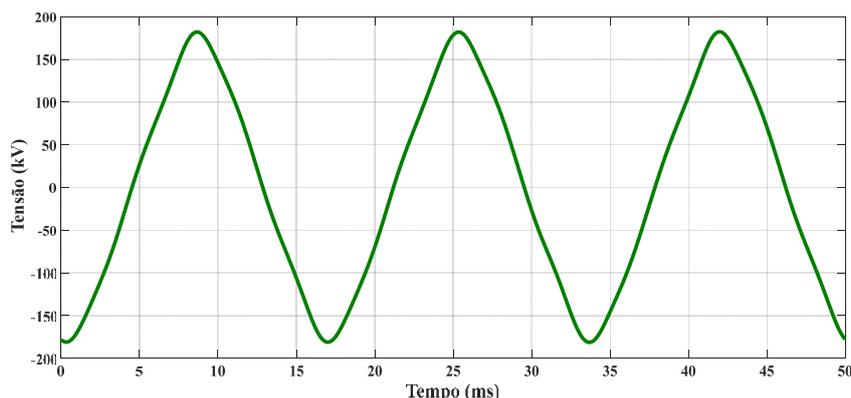
Figura 17 – (a) arranjo experimental; (b) fotografia do arranjo experimental.



Fonte: próprio autor.

Tendo em vista a classificação do para-raios de 20 kA, aplicou-se um nível de tensão próximo do seu nível de tensão residual máxima, 180 kV (pico), durante 60 s. O resultado do ensaio consiste na aquisição do sinal da tensão aplicada sobre o invólucro do para-raios, cuja forma de onda é apresentada na Figura 18. Com o nível de tensão aplicado, não houve tensão disruptiva no interior da porcelana. A norma não foi seguida à risca, para evitar transtornos financeiros com danificação de equipamento do laboratório, caso houvesse ocorrido tensão disruptiva.

Figura 18 – Forma de onda do sinal de tensão aplicado sobre o invólucro de porcelana.



Fonte: próprio autor.

3.1.3 ENSAIO DE TENSÃO RESIDUAL

Para a realização do ensaio, faz-se necessário a abordagem de alguns conceitos relevantes que estão relacionados com o comportamento do para-raios, em especial

durante o ensaio de tensão residual. Os conceitos e suas definições são apresentados a seguir, considerando as definições apresentadas em (NBR 16050, 2012; IEC 60099-4, 2014).

- **Tensão residual:** valor máximo da tensão que surge entre os terminais do para-raios, durante a passagem da corrente de descarga, seja esta de origem atmosférica ou de operação de manobra.
- **Impulso de corrente íngreme:** impulso de corrente, com tempo de frente de 1 μs , medido a partir da origem virtual, com limites no ajuste do equipamento tais que os valores medidos se situam entre 0,9 μs e 1,1 μs . E, ainda, o tempo até meia cauda, medido a partir da origem virtual, tem que ser menor que 20 μs .
- **Impulso de corrente de descarga atmosférica:** impulso de corrente, com forma 8/20 μs , com limites no ajuste do equipamento tais que os valores de tempo, medidos a partir da origem virtual, estejam entre 7 μs e 9 μs para o tempo de frente e entre 18 μs e 22 μs para o tempo até meia cauda.
- **Impulso de corrente de operação de manobra:** impulso de corrente com um tempo de frente compreendido entre 30 μs e 100 μs e um tempo de meia cauda de aproximadamente duas vezes o tempo de frente.

De modo geral, o objetivo dos ensaios de tensão residual é obter os máximos valores de tensão residual para um determinado projeto, no caso de para-raios de ZnO, e para todas as correntes e formas de ondas especificadas. Assim, é possível determinar os níveis de proteção do para-raios ensaiado. Os ensaios de tensão residual são diferenciados pela forma de impulso de corrente simulada. Nesse sentido, é previsto em norma três tipos de ensaios: ensaio de tensão residual a impulso de corrente íngreme; ensaio de tensão residual a impulso atmosférico; e ensaio de tensão residual a impulso operação de manobra.

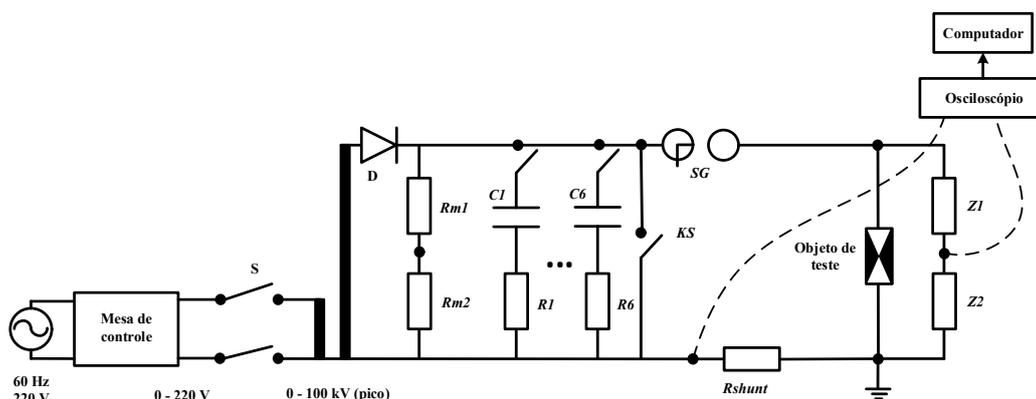
As normas técnicas presentes na literatura fazem algumas recomendações quanto às generalidades dos ensaios de tensão residual. A primeira delas é que os ensaios devem ser realizados com para-raios completos ou em seções representativas. Outra recomendação relevante é que os tempos entre aplicações de impulso deve ser tal que permitam que os corpos de prova sob ensaio retornem à temperatura ambiente. É

importante também destacar que, em para-raios de distribuição com tensões nominais de até 12 kV, o ensaio deve ser realizado no para-raios completo; já para tensões nominais acima de 12 kV, esse ensaio pode ser realizado em seções representativas com tensão nominal mínima de 12 kV.

3.1.3.1 ENSAIO DE TENSÃO RESIDUAL A IMPULSO DE CORRENTE ÍNGREME

Para realização do ensaio de tensão residual a impulso de corrente íngreme foi utilizado circuito elétrico apresentado na Figura 19, por meio do kit do GIC apresentado na Figura 3. Esse circuito é responsável por simular um impulso de corrente íngreme, em virtude dos elementos empregados, os quais são apresentados na Tabela 1. Esse circuito é capaz de gerar uma forma de onda de $1,5/26 \mu\text{s}$, de acordo com a tabela de configurações pré-definidas, a qual foi construída por meio do manual do GIC e uma série de testes realizados pelos pesquisadores do LAT.

Figura 19 – Circuito elétrico do GIC do LAT configurado para gerar impulsos de corrente em para-raios de ZnO com forma de onda $1,5/26 \mu\text{s}$.



Fonte: próprio autor.

Tabela 1 - Valores dos elementos do GIC para gerar impulsos de corrente com formas de onda $1,5/26 \mu\text{s}$.

Impulsos de corrente	Número de estágios	Resistores (Ω)	Indutor (μH)
$1,5/26 \mu\text{s}$	6,0	17,5	-

Fonte: próprio autor.

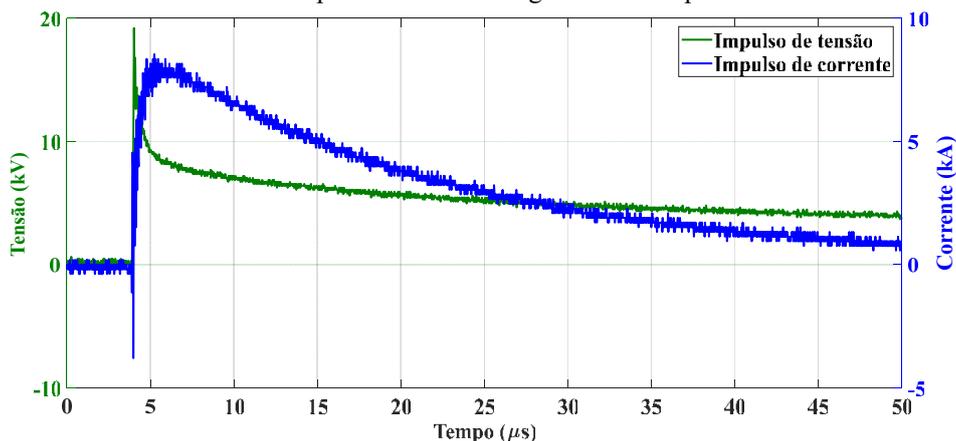
A partir do circuito montado, com base na Figura 19, obteve-se o resultado apresentado na Figura 20. Os sinais apresentados na Figura 20 consistem em um impulso de corrente íngreme e a respectiva tensão residual medida. Verifica-se que o tempo de frente e o tempo de meia cauda estão próximos da forma esperada. Durante o ensaio, a adoção de alguns procedimentos é necessária para o manuseio correto do GIC. Nesse

sentido, ajustou-se o osciloscópio para registrar um impulso de corrente com forma de onda 1,5/26 μs e amplitude de 10 kA. Após a montagem, realizaram-se as configurações necessárias na mesa de controle, para que o impulso de corrente com amplitude de 10 kA fosse gerado.

3.1.3.2 ENSAIO DE TENSÃO RESIDUAL A IMPULSO DE CORRENTE DE DESCARGA ATMOSFÉRICA

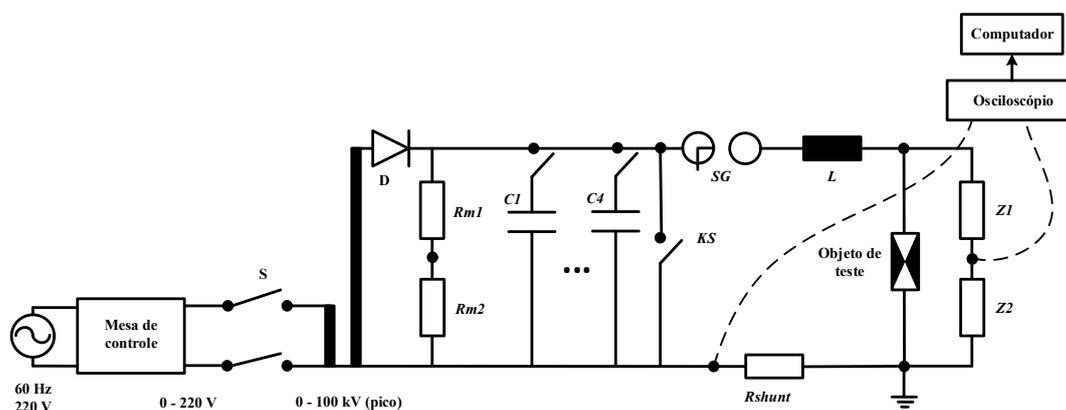
Para realização do ensaio de tensão residual a impulso de corrente de descarga atmosférica foi utilizado o circuito elétrico apresentado na Figura 21. Esse circuito é responsável por simular um impulso de corrente de descarga atmosférica, em virtude dos elementos empregados, os quais são apresentados na Tabela 2. Esse circuito é capaz de gerar uma forma de onda de 8/20 μs , de acordo com a tabela de configurações pré-definidas do GIC do LAT.

Figura 20 – Formas de onda do impulso de corrente íngreme e da respectiva tensão residual medida.



Fonte: próprio autor.

Figura 21 - Circuito elétrico do GIC do LAT configurado para gerar impulsos de corrente em para-raios de ZnO com forma de onda 8/20 μs .



Fonte: próprio autor.

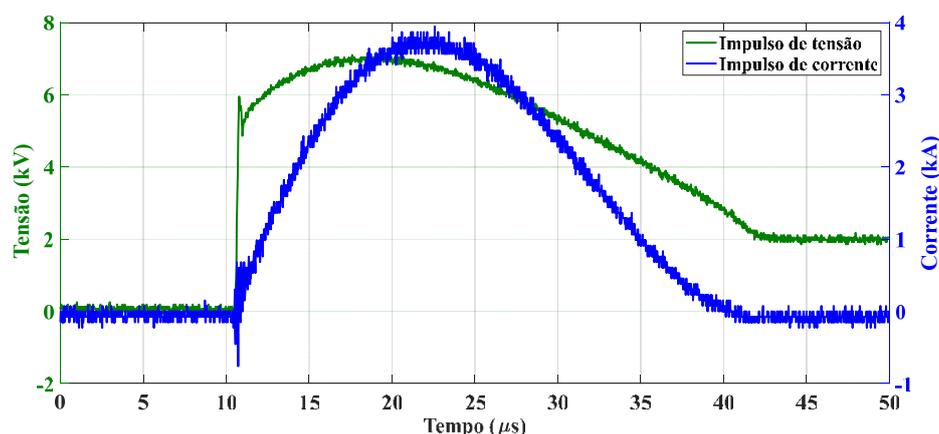
Tabela 2 - Valores dos elementos do GIC para gerar impulsos de corrente com formas de onda 8/20 μ s.

Impulsos de corrente	Número de estágios	Resistores (Ω)	Indutor (μ H)
8/20 μ s	4,0	$\approx 0,0$	5,7

Fonte: próprio autor.

Os resultados obtidos por meio do ensaio elétrico realizado com base no circuito apresentado na Figura 21 são ilustrados na Figura 22. Os sinais apresentados na Figura 22 consistem em um impulso de corrente de descarga atmosférica e a respectiva tensão residual medida. Consta-se que o tempo de frente e o tempo de meia cauda estão próximos da forma esperada.

Figura 22 – Formas de onda do impulso de corrente de descarga atmosférica e da respectiva tensão residual medida.

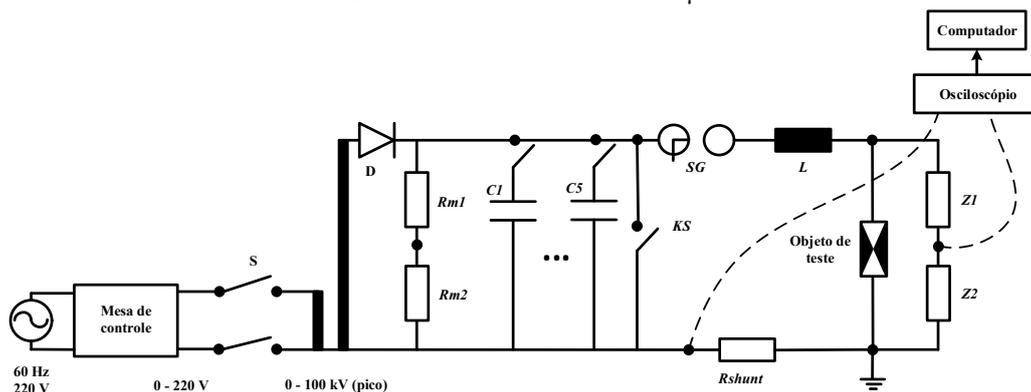


Fonte: próprio autor.

3.1.3.3 ENSAIO DE TENSÃO RESIDUAL A IMPULSO DE CORRENTE DE OPERAÇÃO DE MANOBRA

Para realização do ensaio de tensão residual a impulso de operação de manobra foi utilizado o circuito elétrico apresentado na Figura 23. Esse circuito é responsável por simular um impulso de corrente de operação de manobra, em virtude dos elementos empregados, os quais são apresentados na Tabela 3. Esse circuito é capaz de gerar uma forma de onda de 30/60 μ s, de acordo com a tabela de configurações pré-definidas do GIC do LAT.

Figura 23 – Circuito elétrico do GIC do LAT configurado para gerar impulsos de corrente em para-raios de ZnO com forma de onda 30/60 μs .



Fonte: próprio autor.

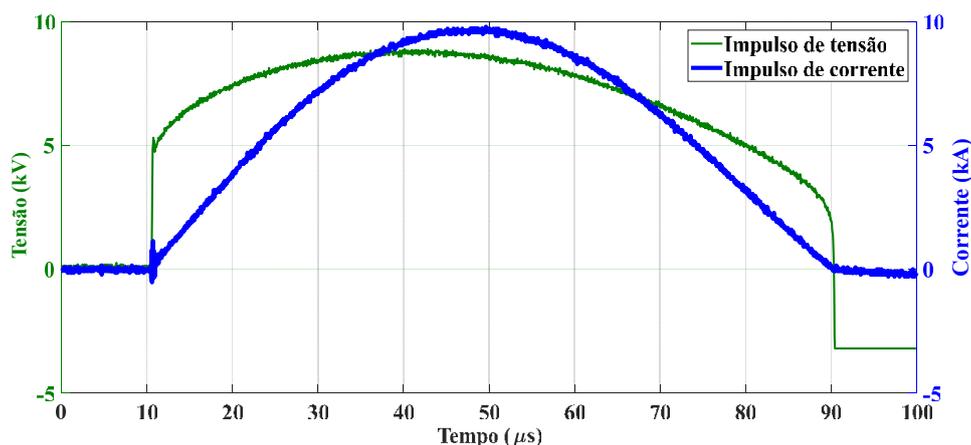
Tabela 3 – Valores dos elementos do GIC para gerar impulsos de corrente com formas de onda 30/60 μs .

Impulsos de corrente	Número de estágios	Resistores (Ω)	Indutor (μH)
30/60 μs	5,0	$\approx 0,0$	61,0

Fonte: próprio autor.

Com relação aos resultados obtidos, tendo em vista a utilização do circuito elétrico apresentado na Figura 23, obtiveram-se os sinais representativos de impulso de corrente de operação de manobra e a respectiva tensão residual medida, conforme apresentado na Figura 24. Verifica-se que o tempo de frente e o tempo de meia cauda estão próximos da forma esperada.

Figura 24 – Formas de onda do impulso de corrente de operação de manobra e da respectiva tensão residual medida.



Fonte: próprio autor.

3.2 ENSAIOS EM FERRAMENTAS E EQUIPAMENTOS PARA MANUTENÇÃO DE LINHAS ENERGIZADAS

O serviço em linha energizada tem se tornado cada vez mais relevante para as empresas do setor elétrico. Esse tipo de serviço é executado por trabalhadores que devem estar protegidos por equipamentos, ferramentas e dispositivos isolantes ou equipamentos com materiais isolantes, destinados ao trabalho em alta tensão. Assim, os equipamentos devem ser submetidos a testes dielétricos periódicos, obedecendo as especificações de fabricação e a legislação vigente.

Nesse sentido, os equipamentos voltados para o uso em serviços com redes elétricas energizadas devem ser submetidos a ensaios dielétricos, para verificação da eficácia da isolação e caracterizar a condição dielétrica do material. A finalidade desses ensaios é constatar a integridade do material isolante dos equipamentos, com o intuito de verificar se o equipamento é seguro para ser empregado em serviços com instalações energizadas. Esses ensaios devem ser executados preferencialmente por empresas certificadoras especializadas.

Os ensaios em ferramentas e equipamentos para manutenção de linha viva, que serão apresentados a seguir, todos eles foram realizados no LAT e solicitados pela empresa Eletro Laser Serviços em Eletricidade. Para realização dos ensaios, diversos equipamentos foram empregados, sendo os principais apresentados a seguir:

- gerador de tensão AC, tipo cascata, 600 kV;
- gerador de tensão AC, 120 kV;
- divisor de tensão capacitivo;
- multímetros digitais;
- osciloscópios digitais;
- termo-higrômetro.

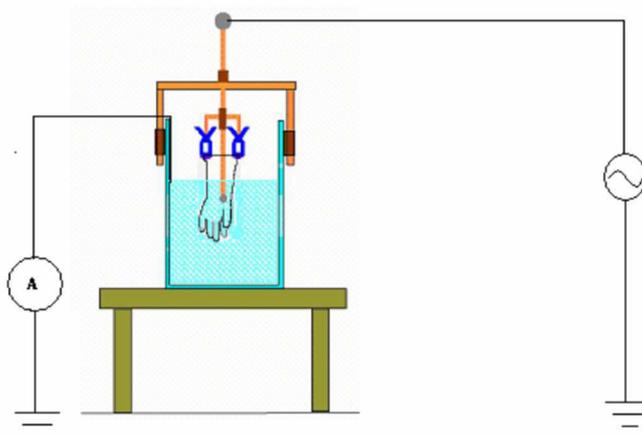
3.2.1 ENSAIOS EM LUVAS ISOLANTES

As luvas isolantes de borracha natural devem ser submetidas a ensaios dielétricos por meio da aplicação de um nível de tensão eficaz, entre a parte metálica do terminal de

tensão de saída do transformador e o cabo de aterramento, durante um intervalo de tempo de 3 min, conforme preconizado em (ASTM D 120, 1995; NBR 16295, 2014).

Durante a execução do ensaio, considerando que a tensão iniciou do zero, realizou-se o seu aumento gradual, à razão aproximada de 1 kV/s, até atingir o nível de tensão de ensaio da luva, 5 kV, que foi mantido por 3 min. Após esse intervalo de tempo, diminuiu-se gradualmente o valor da tensão ao valor zero. Ao longo do ensaio, os valores, inicial (imediatamente após a contagem) e final (próximo dos 3 min), da corrente de fuga foram medidos e registrados. Por fim, as luvas foram lavadas cuidadosamente, sem a utilização de estufa. Apresenta-se na Figura 25 um diagrama representativo do arranjo experimental empregado durante os ensaios de luva isolante. Já na Figura 26 algumas fotografias referentes aos ensaios são apresentadas.

Figura 25 – Diagrama representativo do arranjo experimental utilizado no ensaio de luva isolante.



Fonte: adaptado de (BORGES *et al.*, 2006).

Figura 26 – Fotografia do ensaio em luvas isolantes.



Fonte: próprio autor.

Após a realização do ensaio, as luvas isolantes ensaiadas foram avaliadas. Para que o equipamento seja considerado aprovado no teste, nenhuma descarga disruptiva (centelha ou *flashover*) no material pode ocorrer durante o período de teste. A corrente de fuga medida no eletrodo de aterramento, que percorre através da luva, não deve exceder o valor máximo estabelecido em (NBR 16295, 2014), conforme apresentado na Tabela 4.

Além do ensaio dielétrico, a luva isolante deve ser visualmente avaliada e encontrada isenta de defeitos externos. O equipamento será considerado reprovado se apresentar alguma perfuração, esfoliação ou rachadura que possibilite penetração na camada isolante.

Tabela 4 – Valores máximos de corrente de fuga em luvas isolantes.

Classe das luvas	Tensão de ensaio (V)	Tensão máxima de uso (V)	Distância H (mm)	Cor	Corrente máxima de fuga (mA)			
					L = 267	L = 356	L = 406	L = 457
00	2500	500	38	Bege	6	10	12	14
0	500	100	38	Vermelho	8	12	14	16
1	10000	75000	38	Branca	-	14	16	18
2	20000	17000	64	Amarela	-	16	18	20
3	30000	26500	89	Verde	-	18	20	22
4	40000	36000	127	Laranja	-	-	22	24

Notas:

1. Exceto para luvas classe 00 e 0, a tensão máxima de uso deve ser baseada na fórmula: tensão máxima de uso deve ser 95% da tensão de ensaio (2000 V).
2. Os valores de tensão elétrica referem-se a valores eficazes.
3. L = comprimento da luva em milímetros.
4. A distância H refere-se a parte emersa da luva (tolerância ± 8 mm).

Fonte: adaptado de (NBR 16295, 2014).

Os resultados obtidos por meio dos ensaios em luvas isolantes são apresentados na Tabela 5. Tendo em vista os critérios para avaliação das ferramentas ensaiadas, constata-se que todas as luvas isolantes foram aprovadas.

Tabela 5 – Resultados referentes aos ensaios em luvas isolantes de borracha, classe 0 – 1 kV, considerando tensão aplicada de 5 kV (60 Hz), durante 3 min, com medição da corrente de fuga.

Item	Lado	Fabricante	Nº de série	Tamanho (pol)	Corrente de fuga (mA)	Laudo	Nº de rastreamento
1	Direito	Novax	3135567	10	3,8 / 3,9	Aprovado	RN03-09/19-11
2	Esquerdo	Novax	3135464		8,0 / 5,0	Aprovado	RN03-09/19-12
3	Direito	Prots	97336	10	5,2 / 5,3	Aprovado	RN03-09/19-13
4	Esquerdo	Prots	97335		5,6 / 5,4	Aprovado	RN03-09/19-14

Fonte: próprio autor.

3.2.2 ENSAIOS EM CAPACETES DE SEGURANÇA

Os capacetes de segurança, pertencentes à classe E, foram submetidos a ensaios dielétricos a partir da aplicação de um nível de tensão eficaz de 20 kV, entre a parte metálica do terminal de tensão de saída do transformador e o cabo de aterramento, durante um intervalo de tempo de 1 min, conforme preconizado em (ASTM E1164, 2012; NBR 8221, 2015).

Ao longo do ensaio, considerando que a tensão inicia do zero, ela foi elevada gradualmente, à razão aproximada de 1 kV/s, até atingir o nível de tensão de isolamento da luva, 20 kV, que foi mantido por 1 min. Após esse intervalo de tempo, o nível de tensão foi reduzido gradualmente ao valor zero. Durante o ensaio, a corrente de fuga foi registrada, para avaliação do capacete a posteriori. Ao término do ensaio elétrico, os capacetes foram lavados cuidadosamente, sem a utilização de uma estufa. O arranjo experimental empregado foi semelhante ao apresentado na Figura 26 para o ensaio de luvas isolantes. Uma fotografia do ensaio em capacetes de segurança é apresentada na Figura 27.

Figura 27 – Fotografia do ensaio em capacete de segurança.



Fonte: próprio autor.

Para avaliação do capacete de segurança, mediu-se e registrou-se a corrente de fuga. De acordo com (NBR 8221, 2015), a corrente de fuga para o capacete classe E, não deve ser superior a 9 mA. Caso contrário, o equipamento é considerado reprovado. Além dessa avaliação, faz-se também a avaliação por inspeção. O equipamento é reprovado se apresentar alguma perfuração, esfoliação ou rachadura que possibilite penetração na camada isolante.

Os resultados obtidos por meio dos ensaios em capacetes de segurança são apresentados na Tabela 6. Tendo em vista os critérios para avaliação das ferramentas ensaiadas, constata-se que todas os capacetes foram aprovados.

3.2.3 ENSAIOS EM BASTÕES DE MANOBRA

Os bastões isolantes de manobra, classificados como tubos de fibra de vidro, devem ser submetidos a ensaios dielétricos por meio da aplicação de um nível de tensão eficaz de 50 kV ou 100 kV, com taxa de elevação de no máximo 3 kV/s, durante um intervalo de tempo de 3 min (ASTM F711, 1989; NBR 11864, 1991). A tensão deve ser aplicada entre eletrodos distantes 300 mm entre si.

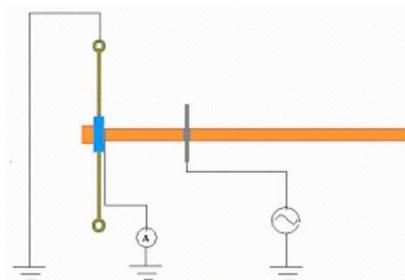
Tabela 6 – Resultados referentes aos ensaios em capacetes de segurança, classe 2 – 17 kV, considerando tensão aplicada de 20 kV (60 Hz), durante 1 min, com medição de corrente de fuga.

Item	Fabricante	Corrente de fuga (mA)	Laudo	Nº de rastreamento
1	Plastcor	3,5 / 3,6	Aprovado	RN03-09/19-07
2	Plastcor	3,6 / 3,6	Aprovado	RN03-09/19-08
3	Plastcor	3,4 / 3,4	Aprovado	RN03-09/19-09
4	Plastcor	3,3 / 3,4	Aprovado	RN03-09/19-10

Fonte: próprio autor.

Para a realização do teste, antes do ensaio propriamente dito, foi efetuada a limpeza do bastão de manobra, removendo a deposição de poeira da superfície do material a ser ensaiado. Em seguida, montou-se o arranjo de ensaio usando os anéis de guarda, com o objetivo de eliminar as correntes elétricas de ionização do ar, que podem aumentar em até 200% o valor real de corrente de fuga. Na Figura 28, apresenta-se um diagrama representativo do arranjo experimental empregado durante os ensaios de bastões de manobra.

Figura 28 - Diagrama representativo do arranjo experimental utilizado no ensaio de bastões de manobra.



Fonte: adaptado de (BORGES *et al.*, 2006).

A medição da corrente elétrica de fuga foi realizada junto ao terminal de aterramento. Para que o bastão isolante de manobra seja aprovado, a corrente de fuga não deve ultrapassar o valor apresentado na Tabela 7.

Os resultados obtidos por meio dos ensaios realizados em bastões de manobra são apresentados na Tabela 8. Considerando os critérios para avaliação das ferramentas ensaiadas, constata-se que todos os bastões foram aprovados.

Tabela 7 – Valores máximos de corrente fuga em hastes e tubos de fibra.

Diâmetro (mm)	Corrente de fuga (mA)	
	100 (kV)	50 (kV)
32	10	5
38	12	6
51	15	8
64	20	10

Fonte: adaptado de (NBR 11864, 1991).

Tabela 8 – Resultados referentes aos ensaios nos cinco elementos do bastão de manobra, considerando tensão aplicada de 100 kV (60 Hz), durante 1 min, com medição de corrente de fuga.

Item	Seção/diâmetro (mm)	Comprimento ensaiado (mm)	Corrente de fuga (μ A)	Laudo	Nº de rastreamento
1	Punho / 32	300	9,6 / 9,7	Aprovado	RN03-09/19-01
2	Interm / 32	300	11,4 / 11,3	Aprovado	RN03-09/19-02
3	Interm / 32	300	10,6 / 10,7	Aprovado	RN03-09/19-03
4	Interm / 32	300	10,3 / 10,3	Aprovado	RN03-09/19-04
5	Ponta / 28	300	9,3/9,4	Aprovado	RN03-09/19-05

Fonte: próprio autor.

3.2.4 ENSAIOS EM CUBAS ISOLANTES

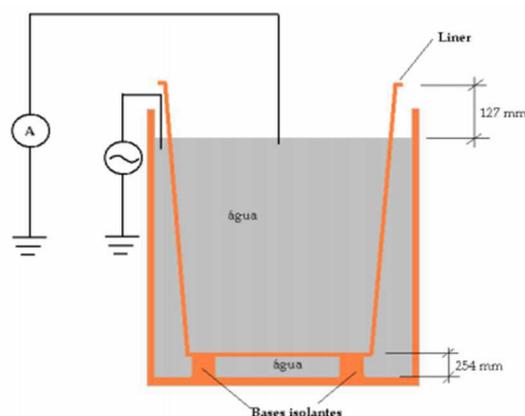
O ensaio em cuba isolante (*liner*) de caminhão de linha viva foi realizado por meio do teste de tensão aplicada, com aplicação de tensão eficaz de 35 kV. No ensaio, o *liner* é preenchido com água e é imerso em um tanque também com água em seu interior. O eletrodo de potencial foi inserido na parte interna do *liner* e o eletrodo de terra utilizado foi a parte externa do tanque, de acordo com o diagrama representativo apresentado na Figura 29.

Com relação à estrutura do arranjo experimental, para o recipiente de ensaio do *liner*, utilizou-se um recipiente de metal, com formato cilíndrico, com a finalidade

suportar o *liner* ensaiado e a água. Para evitar o contato do *liner* ensaiado com o recipiente metálico, utilizaram-se bases isolantes para apoiar o *liner* no fundo do recipiente, possibilitando uma distância de 254 mm, entre o *liner* e o recipiente.

Como critério para verificar a integridade do *liner*, o mesmo é considerado aprovado caso não ocorra descargas disruptivas ou perfuração do material isolante durante o ensaio. Tendo em vista isso, de acordo com a Tabela 9 é verificado que o bastão de manobra foi considerado aprovado.

Figura 29 - Diagrama representativo do arranjo experimental utilizado no ensaio de cubas isolantes (*liners*).



Fonte: adaptado de (BORGES *et al.*, 2006).

Tabela 9 - Resultado referente ao ensaio no *liner*, considerando tensão aplicada de 35 kV (60 Hz), durante 1 min.

Item	Laudo	Nº de rastreamento
1	Aprovado	RN03-09/19-06

Fonte: próprio autor.

3.2.5 ENSAIOS EM LENÇÓIS ISOLANTES

Os lençóis isolantes, de borracha natural, foram submetidos a ensaios dielétricos por meio da aplicação de um nível de tensão eficaz, de acordo com a classe ensaiada, conforme apresentado na Tabela 10, entre a parte metálica do terminal de tensão de saída do transformador e o cabo de aterramento, durante um intervalo de tempo de 3 min (ASTM D178, 2010). Para tanto, o terminal de tensão de saída do transformador deve ser conectado ao eletrodo que está em contato com uma das faces do lençol isolante; já a outra face deve ser conectada ao condutor de aterramento.

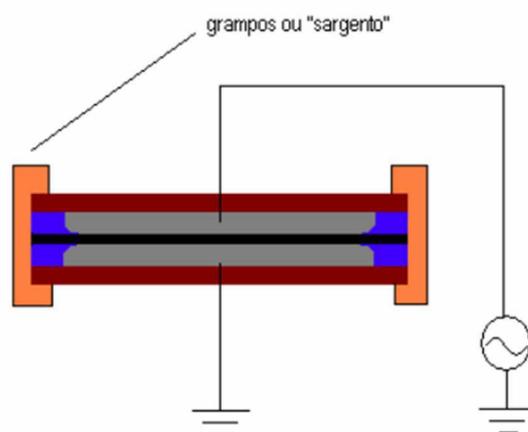
Para execução do ensaio, inicialmente, foi colocado o lençol isolante sobre o eletrodo inferior. Em seguida, colocou-se o eletrodo superior sobre o lençol isolante. Para a uniformidade do lençol isolante, prenderam-se as bordas com grampos de linha viva. Na Figura 30, apresenta-se um diagrama representativo do arranjo experimental empregado durante os ensaios de lençóis isolantes.

Tabela 10 – Ensaio de tensão aplicada em lençóis isolantes.

Classe de isolamento	Tensão de teste (V)	Nº de rastreamento
0	500	76
1	10000	76
2	20000	127
3	30000	178
4	40000	178

Fonte: adaptado de (ASTM D178, 2010).

Figura 30 – Diagrama representativo do arranjo experimental utilizado no ensaio de lençóis isolantes.



Fonte: adaptado de (BORGES *et al.*, 2006).

Com o término do ensaio, os lençóis isolantes foram avaliados. Para que esse equipamento seja considerado aprovado no teste, nenhuma disrupção elétrica (faísca ou *flashover*) no material pode ocorrer durante o período de teste. Ademais, o lençol isolante foi avaliado, visualmente, e constatado isento de defeitos. Esse equipamento poderia ser considerado reprovado se apresentasse alguma perfuração, esfoliação ou rachadura.

Considerando os critérios adotados para avaliar a integridade dos lençóis isolantes, a partir da Tabela 11, que apresenta os resultados obtidos nos ensaios realizados em lençóis isolantes, constata-se que todos eles foram aprovados.

3.3 TESTES COM SISTEMA DE MONITORAMENTO REMOTO DE PARA-RAIOS DE ZNO

Considerando a importante função que os para-raios de ZnO exercem nos sistemas elétricos, é imprescindível o desenvolvimento de sistemas de monitoramento de para-raios de ZnO, visto que eventuais falhas nos para-raios podem conduzir a desligamentos não programados, danos a outros equipamentos de uma subestação (e.g., transformador de potência, banco de capacitores etc.) e principalmente, podem implicar em risco de morte aos profissionais que trabalham em campo (COSTA, 1999; LIRA, 2012).

Tabela 11 – Resultados dos ensaios realizados em lençóis isolantes, da classe 0 - 1 kV, considerando tensão aplicada de 5 kV (60 Hz), durante 3 min, com medição de corrente de fuga.

Item	Fabricante	Laudo	Nº de rastreamento
1	Seguna	Aprovado	RN03-09/19-15
2	Seguna	Aprovado	RN03-09/19-16
3	Seguna	Aprovado	RN03-09/19-17
4	Seguna	Aprovado	RN03-09/19-18
5	Seguna	Aprovado	RN03-09/19-19
6	Seguna	Aprovado	RN03-09/19-20
7	Seguna	Aprovado	RN03-09/19-21
8	Seguna	Aprovado	RN03-09/19-22
9	Seguna	Aprovado	RN03-09/19-23
10	Seguna	Aprovado	RN03-09/19-24

Fonte: próprio autor.

Devido à elevada não linearidade entre a tensão e a corrente, o para-raios é colocado em paralelo com equipamento a que se destina a proteger. Em regime normal de operação, uma corrente de fuga da ordem de microampere percorre o para-raios. Essa corrente é composta de uma componente capacitiva e outra resistiva, sendo a componente capacitiva predominante. Os para-raios operam nessa região praticamente toda sua vida útil, cerca de 30 anos (MATSUOKA, 1971; HINRICHSEN, 1997). A medida que o para-raios se degrada, a componente resistiva cresce até desencadear o colapso do para-raios, caso não seja retirado de serviço.

Apesar da componente resistiva da corrente de fuga ser um bom indicador do nível de degradação dos para-raios de ZnO, sua medição em campo é complexa devido à

necessidade de se realizar a medição da tensão aplicada no para-raios (LIRA, 2012). Sendo assim, abordagens baseadas apenas na medição e análise da corrente de fuga total vêm sendo propostas e demonstrando boa confiabilidade, não só para diagnosticar o para-raios como também para indicar o tipo de defeito presente (BARBOSA *et al.*, 2019).

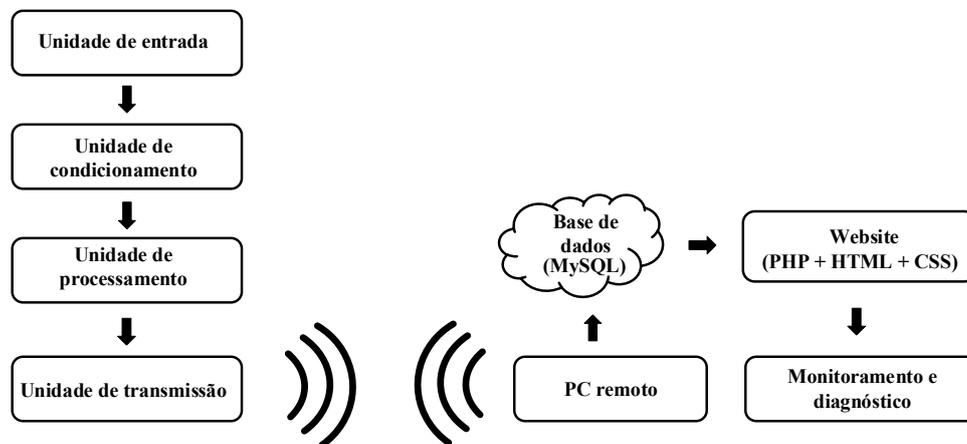
Com a finalidade de prevenir prejuízos financeiros às concessionárias de energia elétrica, sejam por meio de multas por parte de órgãos reguladores, processos judiciais ou danos à imagem das empresas, pesquisadores do LAT desenvolveram um sistema de monitoramento remoto de para-raios de ZnO baseado na medição apenas da corrente de fuga total. O sistema é composto pelas seguintes unidades: entrada, condicionamento, processamento, transmissão, recepção de dados e diagnóstico.

O sistema de monitoramento é composto por diversos módulos/unidades, os quais desempenham funções específicas e determinadas. A Figura 31 apresenta o diagrama de blocos do sistema proposto. A unidade de entrada é responsável por realizar a aquisição do sinal da corrente de fuga total, assim como da temperatura ambiente, a qual pode ser utilizada para fins de compensação dos sinais medidos. Na unidade de condicionamento, realizam-se os ajustes necessários (retificação, integração etc.) aos sinais de corrente para que eles possam ser processados. A unidade de processamento tem como atribuições principais coordenar a leitura, digitalização, armazenamento e envio de dados. A unidade de transmissão é responsável por enviar, via rede de sensores sem fio (padrão ZigBee), os dados recebidos. A unidade de recepção possui a finalidade de receber os dados enviados por meio da rede sem fio e armazená-los em base de dados para posterior análise. A unidade de monitoramento executa um sistema baseado em Redes Neurais Artificiais (RNAs) capaz de determinar o estado operativo do para-raios.

Para o acompanhamento da corrente de fuga total e posterior análise desse sinal, optou-se pela criação de uma página *web*. Assim, os dados não se encontrarão em um computador específico como em outros sistemas de monitoramento, mas em um servidor. Com a computação nas nuvens (*cloud computing*), muitos aplicativos, arquivos e outros dados relacionados, não precisam estar instalados ou armazenados no computador do usuário ou em um servidor próximo. Dessa forma, esse conteúdo passa a ficar disponível na *internet*. O servidor *web* utilizado foi o Apache devido à sua conhecida robustez e ao fato de ser gratuito. A aplicação de monitoramento e diagnóstico foi desenvolvida em PHP, a qual é uma linguagem de programação que permite criar sites *web* dinâmicos, possibilitando a interação com usuários por meio de formulário, parâmetros da URL e *links*. O PHP é executado no servidor, sendo enviado para o cliente apenas o código na

linguagem HTML, assim é possível comunicar-se com o banco de dados, sem que o código fonte seja revelado (TAURION, 2009; NOGUEIRA & PEZZI, 2010). Os dados medidos e processados são armazenados e gerenciados por meio do MySQL.

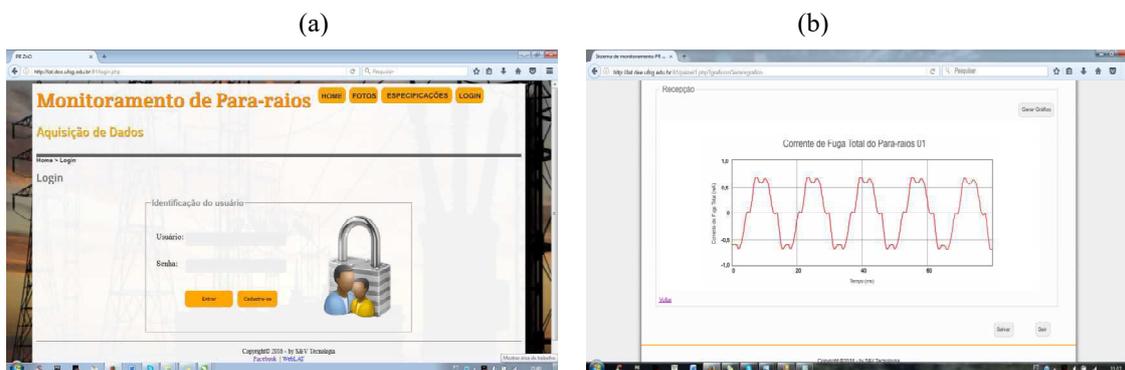
Figura 31 – Diagrama de blocos do sistema de monitoramento remoto de para-raios de ZnO.



Fonte: adaptado de (LIRA *et al.*, 2017).

A partir de um computador central, quando solicitadas, as informações são enviadas ao banco de dados, estando disponíveis ao usuário em qualquer lugar desde que este esteja conectado à *internet*, por meio de uma página *web* interativa e de fácil manuseio. Verifica-se, nas Figura 32-(a) e Figura 32-(b), a plataforma *on-line* desenvolvida.

Figura 32 – (a) página de acesso; (b) gráfico da corrente de fuga total medida remotamente.



Fonte: adaptado de (LIRA *et al.*, 2017).

A fim de agrupar todas as unidades do sistema de monitoramento remoto de para-raios de ZnO, construiu-se um protótipo, o qual é apresentado na Figura 33. Com relação à constituição do protótipo, além do sistema microcontrolado de medição de corrente de fuga, tem-se um computador utilizado na recepção das informações, carregando-as em um banco de dados que podem ser acessadas de qualquer lugar, desde que se tenha acesso à *internet*. O módulo de aquisição de dados, que é ilustrado na Figura 33, foi construído

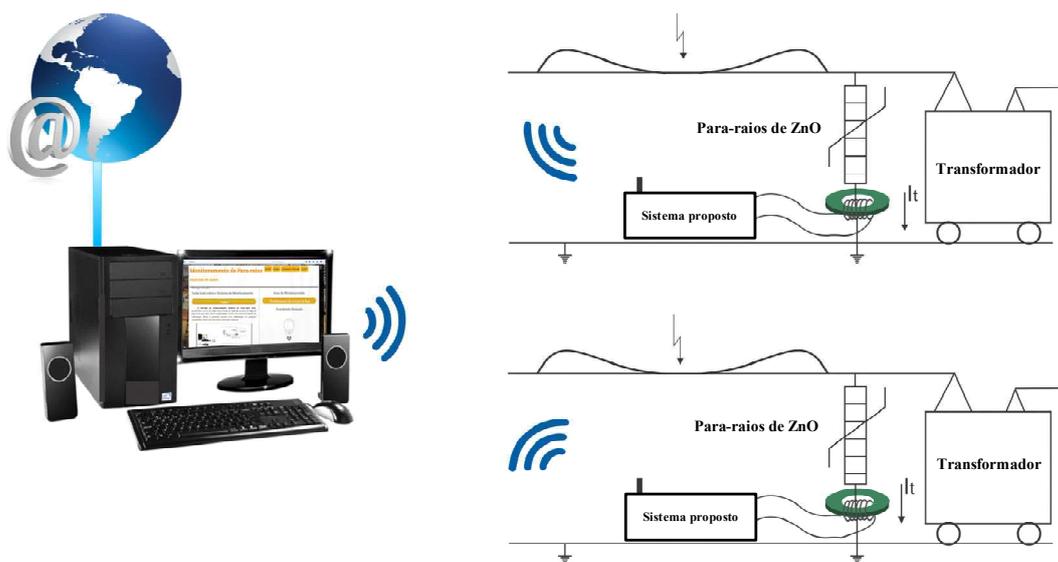
para ser fixado no cabo de terra do para-raios e remotamente enviar os sinais de corrente medidos à sala de comando, conforme ilustrado na Figura 34.

Figura 33 – Fotografia do sistema de monitoramento de para-raios de ZnO desenvolvido no LAT.



Fonte: adaptado de (LIRA *et al.*, 2017).

Figura 34 – Diagrama esquemático de funcionamento do sistema de monitoramento e diagnóstico de para-raios de ZnO desenvolvido no LAT.



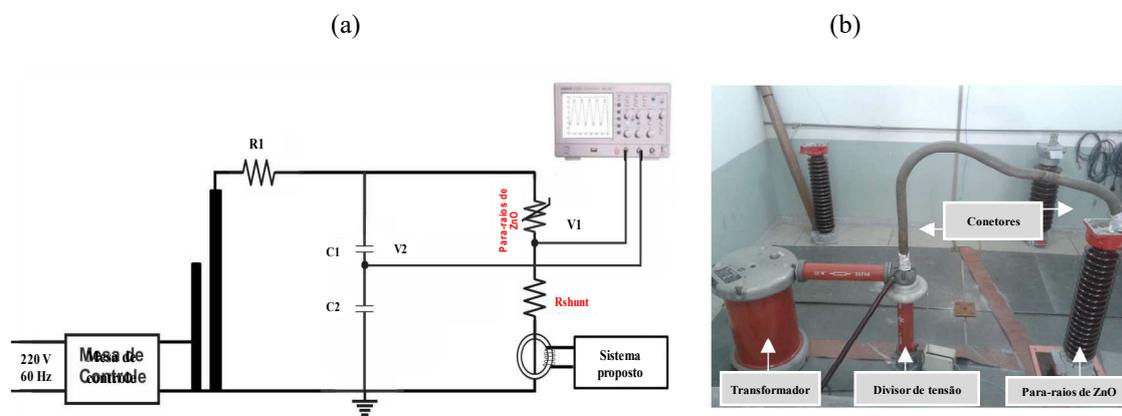
Fonte: adaptado de (LIRA *et al.*, 2017).

Uma vez verificado o funcionamento do sistema de monitoramento, alguns ensaios foram realizados no kit de alta tensão, a fim de validá-lo. Essa validação foi realizada por meio de comparações dos resultados obtidos a partir do sistema proposto e aquele tipicamente empregado na medição de corrente de fuga total de para-raios. O ensaio necessário para a medição da tensão e corrente de fuga do para-raios foi realizado utilizando como referência o diagrama esquemático do arranjo experimental visualizado

na Figura 35-(a). Na Figura 35-(b) é apresentada uma fotografia do arranjo experimental empregado nas validações do sistema de monitoramento.

O circuito apresentado na Figura 35 é composto por uma fonte de alta tensão controlável (0-100 kV), uma resistência de proteção R_1 , um divisor capacitivo ($C_1 - C_2$) que permite medir altas tensões, o para-raios e uma resistência *shunt* para medições indiretas de corrente. As aquisições de dados são realizadas por pontas de prova e um osciloscópio digital. Adicionalmente ao circuito típico de medição de corrente, adicionou-se o sistema proposto, o qual é baseado na utilização de um Transformador de Corrente (TC) adequado para medições de sinais de baixa amplitude.

Figura 35 - (a) diagrama do arranjo experimental; (b) fotografia do arranjo experimental.



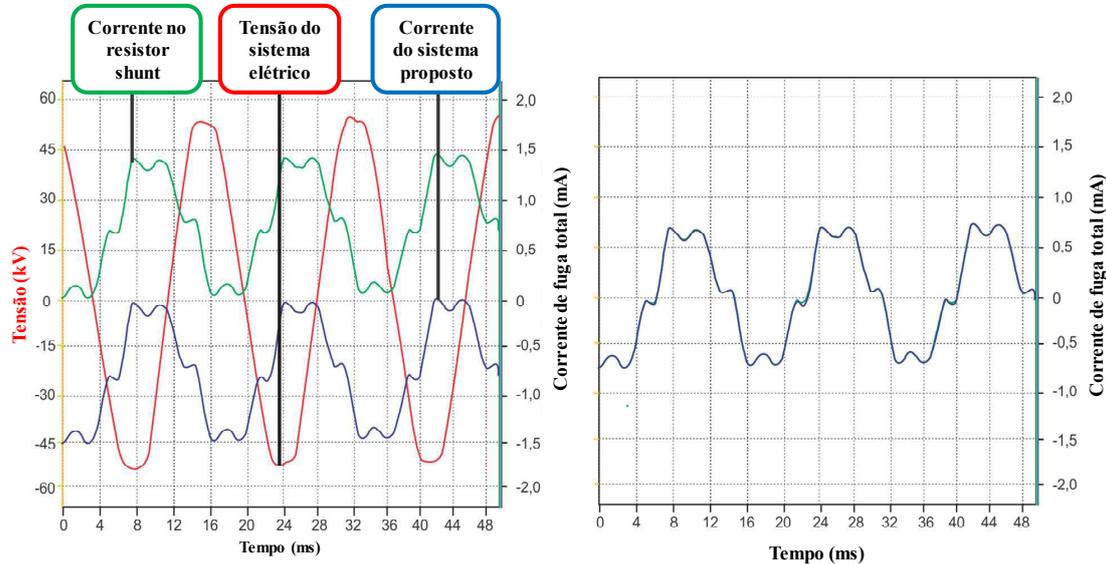
Fonte: adaptado de (LIRA *et al.*, 2017).

Para validar o sistema de monitoramento, foram realizadas medições de corrente de fuga em para-raios com tensão nominal 72 kV (RMS) e MCOV 42 kV (RMS). Para isso, o para-raios foi submetido à MCOV, e a corrente de fuga foi medida, simultaneamente, por meio do resistor *shunt* e do sistema de monitoramento desenvolvido. Apresenta-se na Figura 36 a tensão aplicada ao para-raios, as formas de onda da corrente de fuga total medidas pelo *shunt* e pelo sistema proposto. Conforme pode ser verificado, as formas de onda são praticamente idênticas. Na Figura 36-(b) os sinais de corrente estão totalmente sobrepostos.

Para uma análise mais exata e confiável foi feito o cálculo do coeficiente de determinação, R^2 . Esse coeficiente indica o quão próximo à forma de onda da corrente de fuga medida pelo sistema de monitoramento desenvolvido está daquela medida pelo resistor *shunt* (referência). O R^2 é definido como sendo a diferença entre o valor unitário e a razão entre a Soma Quadrática dos Erros de Estimção (SSE, do inglês *Sum of Squared*

Estimate of Errors) e a Soma dos Erros Quadráticos (SST, do inglês *Total Sum of Squares*), de acordo com (1).

Figura 36 – Formas de onda da corrente de fuga total provenientes do resistor *shunt* (verde) e do sistema de monitoramento desenvolvido (azul).



Fonte: adaptado de (LIRA *et al.*, 2017).

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}, \quad (1)$$

$$SSE = \sum_{j=1}^m [v_m(j) - v_l(j)]^2, \quad (2)$$

$$SSE = \sum_{j=1}^m [v_m(j) - \bar{v}_m(j)]^2. \quad (3)$$

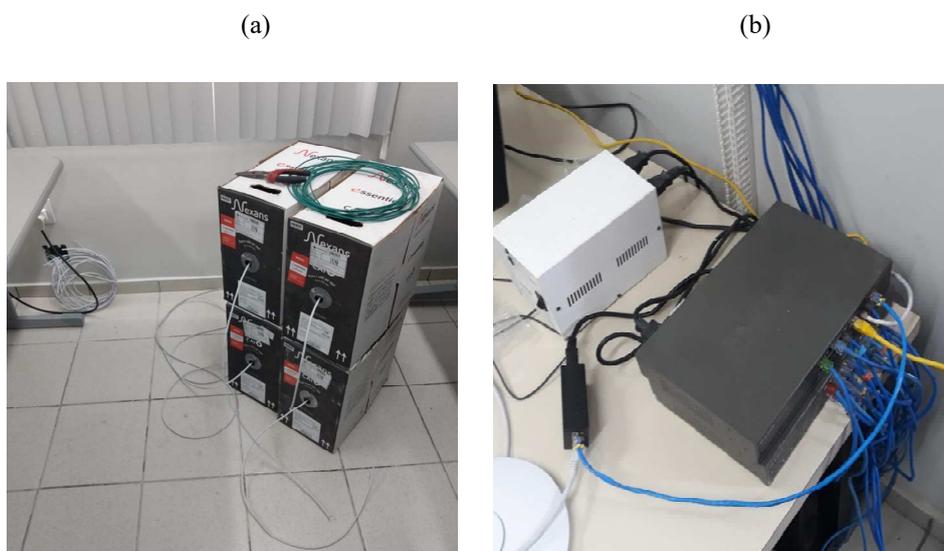
Quanto mais próximo do valor unitário, 1, mais semelhantes são os sinais. No teste realizado, o valor de R^2 foi próximo de 0,9991. Dessa forma, os resultados mostram a viabilidade e a confiabilidade do sistema de monitoramento da corrente de fuga dos para-raios de ZnO baseado na sua corrente de fuga.

3.4 INSTALAÇÃO DE CABOS DE REDE DE *INTERNET*

O LAT passou por uma reforma na sua estrutura física, interna e externa, durante parte do período do estágio supervisionado. Um dos objetivos dessa reforma foi a troca de todos os cabos de rede de *internet*. Os motivos para realizar essa troca são vários, sendo destacado, dentre eles, os seguintes: emprego de novos cabos de rede; reposicionamento de tomadas de rede; mudança da estética de algumas salas etc. Dentre as salas que

sofreram manutenções para mudança do cabo de rede, os estagiários do LAT puderam participar da manutenção realizada nas salas de graduação, pós-graduação, auditórios e sala que armazena o servidor. Na Figura 37, apresentam-se algumas fotografias que representam os serviços realizados referentes às trocas dos cabos de rede na sala da graduação. Dentre as ferramentas utilizadas nesse tipo de atividade, destaca-se o guia passa fio, visto que ele facilitou de forma significativa a passagem dos cabos de *internet* por meio dos eletrodutos.

Figura 37 – Fotografias realizadas na (a) sala de graduação e na (b) sala que armazena o servidor.



Fonte: próprio autor.

3.5 LEVANTAMENTO DE EQUIPAMENTOS E INSTRUMENTOS

Existem vários tipos de equipamentos pertencentes ao LAT, que a grande maioria se encontram no almoxarifado. Diante do quantitativo elevado de equipamentos, faz-se necessário o levantamento periódico, a fim de que todos os equipamentos sejam registrados, pelos seguintes motivos: monitoramento do seu funcionamento; atualização de novos equipamentos; acompanhamento dos empréstimos realizados; dentre outros. Na Figura 38 é apresentado uma planilha, elaborada no Excel, que foi empregada no levantamento de equipamentos e instrumentos. O levantamento foi realizado nos seguintes ambientes: almoxarifado, LEASE e LQEE.

3.6 ENSAIOS COM A FONTE PROGRAMÁVEL AC

A fonte de alimentação AC programável consiste em uma fonte que permite ajustar os sinais alternados pela mesma, no que diz respeito à forma e a amplitude do sinal. Apresenta-se na Figura 39 uma fotografia da fonte programável. Essa fonte é caracterizada por possuir, além de várias outras, a capacidade de gerar harmônicos, forma de onda arbitrária e transitórios, além de permitir configurar os valores de corrente, tensão e frequência. Para manuseio dessa fonte programável, é possível empregar dois tipos de interfaces. Há uma interface acoplada à fonte programável, que permite interagir com a mesma, denominada de Interface Humano-Máquina (IHM). Outra interface que pode ser empregada para controlar a fonte é a interface gráfica denominada de *Graphical User Interface* (GUI), que pode ser instalada em um computador ou *notebook* para que o usuário possa interagir com a fonte programável sem configurar diretamente na parte física da mesma. Nas Figuras 40-(a) e 40-(b) são apresentadas as interfaces, IHM e a GUI, respectivamente.

Figura 38 – Planilha referente ao levantamento ao equipamentos e instrumentos pertencentes ao LAT.



Descrição	Modelo	Marca	Nº Série	Quantidade	Preço médio	Link foto	Manual	Obs.	Situação
Osciloscópio - Tektronix	TDS 2024B		C039283	1					
Osciloscópio - Tektronix	TDS 2014		C043615	1					
Osciloscópio - Tektronix	TDS 2014		C012426	1					
Osciloscópio - Tektronix	TDS 2014		C018639	1					
Osciloscópio - Tektronix	TDS 2012		C043704	1					
Dayco II									
Termovisor - Flir Systems	Therma Cam P65		23402234	1					
Ponta de prova de alta tensão - Agilent	N2771B		20111899	1					
Ponta de prova de alta tensão - Agilent	N2771B		20111607	1					
Ponta de prova de alta tensão - Tektronix	P6015			1					
Ponta de prova de alta tensão - Tektronix	P6015A		B055353	1					
Ponta de prova de alta tensão - Tektronix	P6015A		B055347	1					
Ponta de prova de alta tensão - Tektronix	P6015A			1					
Ponta de prova de alta tensão - Tektronix	P6015A		C073553	1					
Ponta de prova de alta tensão - Tektronix	P6015A		C073561	1					
Ponta de prova de alta tensão - Tektronix	P6015A		C092281	1					
Ponta de prova de alta tensão - Tektronix	P6015A		C073534	1					
Ponta de prova de alta tensão - Tektronix	P6015A		C092284	1					
Ponta de prova de alta tensão - Tektronix	P6015A		C092280	1					
Trafo	Sotrafo		4127	1					
Indutor de década - Telmes	TR9120		98094	1					

Fonte: próprio autor.

Com relação às aplicações que podem ser realizadas com a fonte programável, algumas delas são:

- projetos que necessitam a geração de harmônicos ou listas de transitórios;
- realização de múltiplas funções em testes de equipamentos em um custo menor, evitando o uso de múltiplos equipamentos;
- capturar formas de ondas do mundo real lidas pelo osciloscópio;
- RTCA DO-160 (*environmental conditions and test procedures for airborne equipment*): padrão de testes realizados para equipamentos aéreos;

- MIL-704: padrão militar dos Estados Unidos que define as diretrizes para o uso de equipamentos aéreos no âmbito militar.

Figura 39 – Fotografia da fonte de alimentação programável AC da *California Instruments*®.

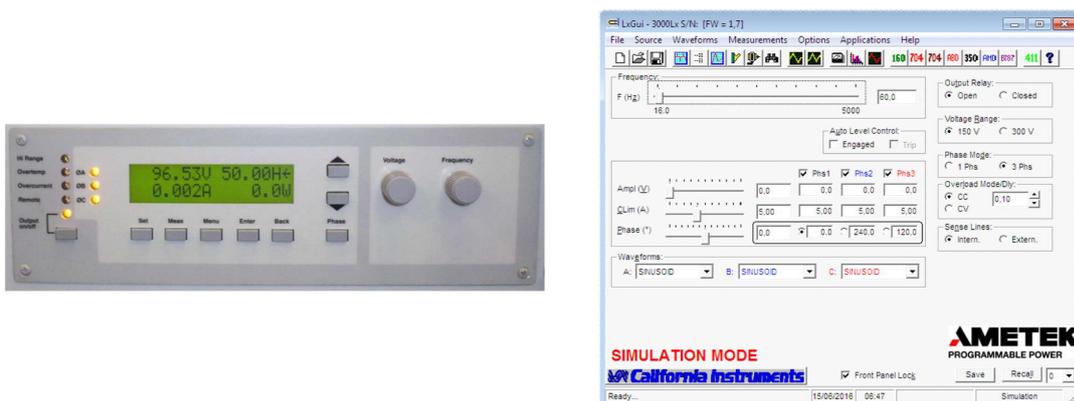


Fonte: próprio autor.

Figura 40 – (a) IHM; (b) GUI.

(a)

(b)



Fonte: próprio autor.

No estágio realizado no LAT, foi possível realizar dois tipos de ensaios elétricos com aplicação da fonte programável. O primeiro ensaio realizado consistiu em gerar um sinal de tensão com distorção harmônica para submeter o para-raios de ZnO a tal sinal. O intuito desse ensaio foi verificar o comportamento do método de monitoramento de para-raios desenvolvido por pesquisadores do LAT. O segundo experimento foi realizado durante a aula da disciplina de Sistemas Elétricos Industriais, que a finalidade da utilização da fonte programável era alimentar um motor elétrico monofásico.

3.7 APRESENTAÇÃO DO LAT PARA VISITANTES

Dentre as atividades desenvolvidas no LAT, algumas delas foram as apresentações concernentes à infraestrutura do laboratório, que ocorre periodicamente, realizadas para os visitantes oriundos de outras instituições, bem como os próprios alunos da UFCG, no início da graduação. Esse tipo de atividade é relevante para os envolvidos na apresentação, visto que a comunidade local e de outras regiões passam a conhecer a infraestrutura do laboratório e, com a apresentação, ele passar a ser mais valorizado e atrair mais estudantes.

Na apresentação ocorrida durante o estágio, quatro tipos de apresentações referentes aos laboratórios internos do LAT foram realizados. Essas apresentações tiveram a finalidade de mostrar e explicar o funcionamento dos equipamentos elétricos instalados nos seguintes recintos: SAT, SGIC, SCN, SKAT e STD. Apresentam-se, na Figura 41, algumas fotografias referentes às apresentações que ocorreram no SAT e SGIC.

Figura 41 – Fotografias no (a) SAT e (b) na SGIC.



Fonte: próprio autor.

3.8 ENSAIO DE ENVELHECIMENTO ACELERADO DE PARA-RAIOS DE ZNO

No LAT existem várias linhas de pesquisa que envolvem ensaios elétricos e simulações computacionais, na área de alta tensão. Uma dessas linhas de pesquisa é voltada para determinação da vida útil de para-raios de ZnO. Em geral, os pesquisadores do LAT empregam estatística ou inteligência artificial para prever o comportamento de séries temporais de alguma grandeza elétrica que seja sensível ao nível de degradação de

para-raios. Como o laboratório ainda não possui um banco de dados constituído de séries temporais, os pesquisadores têm realizado ensaios de envelhecimento acelerado de para-raios de ZnO, com base no modelo de Arrhenius, para construir um banco de dados composto de séries temporais. Elas possuem informações da corrente de fuga total que percorre o para-raios, em especial a sua componente resistiva ou a terceira componente harmônica da corrente.

Para a realização dos ensaios em laboratório de alta tensão, foi empregado o diagrama esquemático do arranjo experimental apresentado na Figura 42-(a). O circuito é composto por uma mesa de controle, um transformador de tensão (0 a 100 kV), um resistor de proteção (282 kΩ), um divisor capacitivo, o objeto de teste (varistor de ZnO) em série com um resistor *shunt* (R_{shunt}), uma estufa térmica e um osciloscópio digital. Para empregar a estufa térmica em conjunto com o kit de alta tensão, realizou-se o isolamento elétrico da carcaça da estufa em relação ao condutor de alta tensão, com a finalidade da estufa ser empregada em série com o resistor *shunt*. Além disso, projetou-se um aparato para suportar o bloco de varistor e conectá-lo ao condutor de alta tensão, conforme apresentado na Figura 42-(b). A fim de medir a tensão aplicada sobre o varistor, utilizou-se o divisor capacitivo, para fazer a aquisição do sinal de tensão. De forma indireta, foi empregado o resistor *shunt* para obter o sinal da corrente de fuga total por meio da aquisição do sinal de tensão aplicado sobre o mesmo.

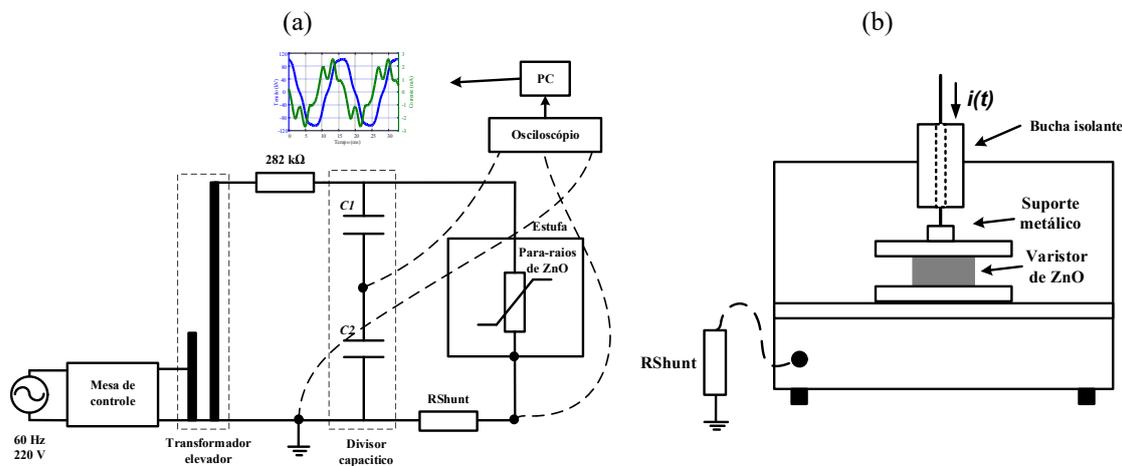
Durante a realização do ensaio de envelhecimento precoce dos varistores de ZnO, utilizou-se o modelo de Arrhenius, cuja representação matemática é apresentada em (4). Para realizar envelhecimento acelerado do varistor em aproximadamente 102 anos, foi necessário assumir $t_{teste} = 6 h$, $T_{teste} = 170^{\circ}C$ e $T_{pad} = 40^{\circ}C$, conforme apresentado em (5). E, ainda, submeteu-se o varistor próximo à tensão de referência, para satisfazer as condições exigidas por norma. O processo de validação do envelhecimento acelerado do varistor é realizado por meio da verificação do nível da tensão de referência. O envelhecimento do varistor é verificado caso a tensão de referência seja reduzida entre 5% e 10%, o que implica em um maior nível de corrente de fuga para o mesmo nível de tensão, considerando que o varistor estava virgem no início do ensaio.

$$t = t_{teste} \times 2,5^{\frac{(T_{teste}-T_{pad})}{10}}, \quad (4)$$

$$t = 6 \times 2,5^{\frac{(170-40)}{10}} = 894.070,00 \text{ minutos}, \quad (5)$$

$$t \approx 102 \text{ anos.}$$

Figura 42 – (A) Arranjo experimental para realização dos ensaios; (b) esquema representativo da estufa térmica.

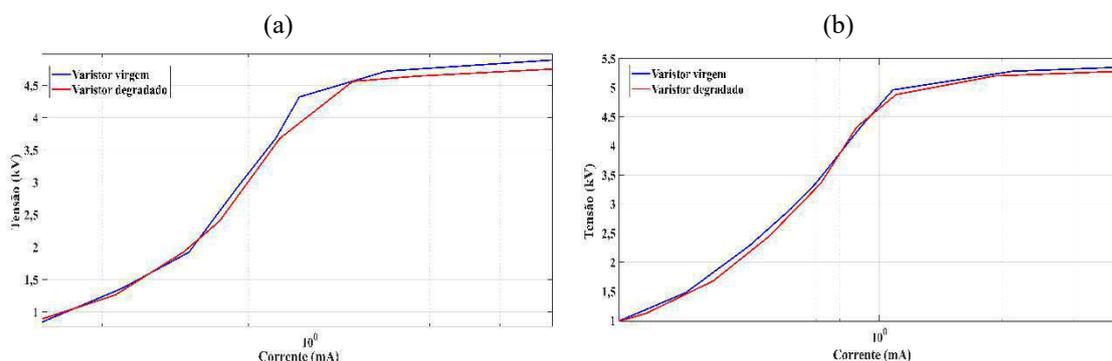


Fonte: próprio autor.

A partir dos ensaios realizados foram obtidos os resultados que possibilitam verificar se o varistor de ZnO ensaiado foi envelhecido. Para realizar essa verificação, as curvas características dos varistores foram traçadas, para os varistores virgens e após a realização do ensaio de envelhecimento. Para verificar se o ensaio de envelhecimento acelerado de varistor foi eficaz, realiza-se a inspeção gráfica e a análise quantitativa, conforme proposto por Doorsamy & Bokoro (2018). De forma geral, é analisado o nível de tensão para o mesmo valor de corrente, considerando a curva $V - I$, antes e após o ensaio de envelhecimento. Para a análise gráfica, o nível de envelhecimento do varistor está relacionado ao deslocamento da curva característica para direita. Já para a avaliação quantitativa, caso haja redução do nível de tensão de referência dentro da faixa de 5% até 10% do nível de tensão inicial em relação ao nível de tensão após o ensaio de envelhecimento, depreende-se que houve falha completa do varistor.

Com relação ao varistor da classe A, o mesmo não foi envelhecido de forma acelerada, já que a redução da tensão de referência constatada, após o ensaio de envelhecimento, foi de 1,70%, haja vista que os níveis de tensão medidos antes e após o ensaio foi de 4,72 kV e 4,64 kV, respectivamente. É importante frisar que apenas o deslocamento da curva característica para direita não garante que a metodologia de envelhecimento tenha sido eficaz. No tocante ao varistor da classe B, o ensaio de envelhecimento acelerado não foi bem-sucedido para essa amostra de varistor, pois a redução da tensão de referência foi de 1,64%, considerando os valores de tensão de referência medidos antes e após o ensaio de envelhecimento de 4,96 kV e 4,88 kV, respectivamente.

Figura 43 – Curvas características obtidas por meio dos ensaios de envelhecimento acelerado de varistores de ZnO (a) para a amostra A e (b) para a amostra B.



Fonte: próprio autor.

3.9 MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE DO SOLO

As instalações elétricas de alta e baixa tensão devem ser conectadas a um sistema de aterramento eficiente. O aterramento pode ser entendido como a ligação elétrica de um equipamento ou componente de um sistema elétrico à terra por meio de dispositivos condutores de eletricidade adequados (VISACRO, 2002). É importante frisar que a terra é entendida como uma massa condutora do solo num dado local ou, ainda, uma massa metálica a ele ligado de modo permanente (SOTILLE & HIRAKAWA, 2008).

Nesse sentido, o sistema de aterramento pode ser definido como o conjunto de todos os eletrodos e condutores de aterramento, interligados ou não entre si, bem como partes metálicas que atuam direta ou indiretamente com a função de aterramento (SOTILLE & HIRAKAWA, 2008). Outra definição importante refere-se ao eletrodo de aterramento, que consiste em um condutor aterrado no solo, eletricamente ligado a ele, ou condutor embutido em concreto, que, por sua vez, está em contato com o solo por meio de uma grande área.

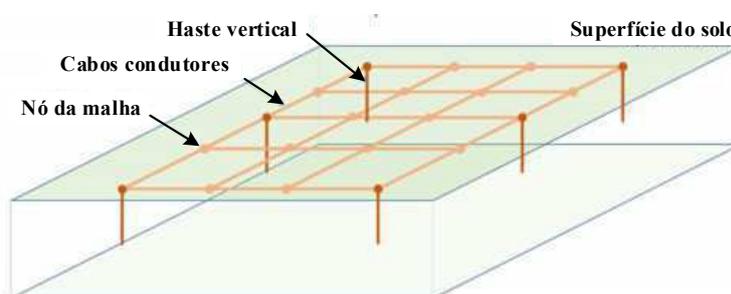
O aterramento possui como objetivo principal ser uma referência para o controle dentro de limites previsíveis. O aterramento também fornece caminho para a circulação de corrente, que permite a detecção de uma ligação indesejada entre os condutores vivos e a terra, provocando a operação de dispositivos automáticos que removerão a tensão nos condutores. Segundo Souza Júnior (2007), o controle das tensões, em relação à terra, limita o esforço da tensão na isolação dos condutores, diminui as interferências eletromagnéticas e possibilita a redução de perigos de choque elétrico para as pessoas que

poderiam entrar em contato com os condutores vivos. Outras finalidades relacionadas aos sistemas de aterramento são descritas a seguir:

- limitar as sobretensões em caso de faltas;
- permitir a circulação da corrente de falta, com valores mais elevados, provocando a atuação das proteções de maneira mais rápida e eficiente;
- manter os valores de tensão entre estruturas metálicas e terra dentro dos valores considerados admissíveis sob o ponto de vista de segurança;
- proporcionar o escoamento para a terra das descargas atmosféricas e/ou sobretensões de chaveamento ou manobra;
- obter uma resistência de aterramento a mais baixa possível para correntes de falta à terra;
- manter os potenciais produzidos pelas correntes de falta dentro de limites de segurança de modo a não causar fibrilação do coração humano;
- usar a terra como retorno de corrente do Sistema Monofilar com Retorno por Terra (MRT).

Com relação à técnica de aterramento mais empregada, nas subestações, geralmente são utilizadas hastes verticais conectadas a uma malha, constituída por cabos condutores, com profundidade de aterramento de, aproximadamente, 30 cm a 1 m em relação à superfície do solo, conforme preconizado em (BEZERRA, 2017). Com o intuito de ilustrar uma malha de aterramento básica, apresenta-se a Figura 44.

Figura 44 – Esquema da constituição de uma malha de aterramento.



Fonte: adaptado de (BEZERRA, 2017).

Para determinação das características de um sistema de aterramento, faz-se necessário a determinação dos valores da resistividade do solo e de sua estratificação. Isso é realizado para subsidiar, principalmente, o desenvolvimento de projetos e determinação de seus potenciais de passo e de torque. Com relação à constituição do solo,

ele é composto por várias camadas, sendo cada uma apresentando um valor de resistividade e uma espessura peculiar. Assim, diversos fatores podem influenciar o valor da resistividade do solo, tais como: composição geológica, umidade e temperatura. Por isso, a medição dessa grandeza é imprescindível no espaço onde será implantado um sistema de aterramento.

Para realizar a medição da resistividade do solo é empregado um terrômetro digital, o qual é apresentado na Figura 45. Esse instrumento de medição possui quatro terminais (dois destinados para medição de corrente e dois para medição de tensão), os quais devem ser conectados a quatro eletrodos, com distância entre eles de comprimento D , de acordo com a ilustração apresentada na Figura 46. O terrômetro possibilita a circulação de corrente elétrica, $i(t)$, nos dois terminais externos, H e E. Assim, por meio das hastes internas, S e ES, o instrumento calcula a diferença de potencial, $v(t)$, e pela lei de Ohm, expressa em (4), calcula o valor da resistência, R . Considerando a equação de Palmer, apresentada em (5), o terrômetro calcula a resistividade.

$$v(t) = Ri(t), \quad (6)$$

$$\rho = 2\pi dR. \quad (7)$$

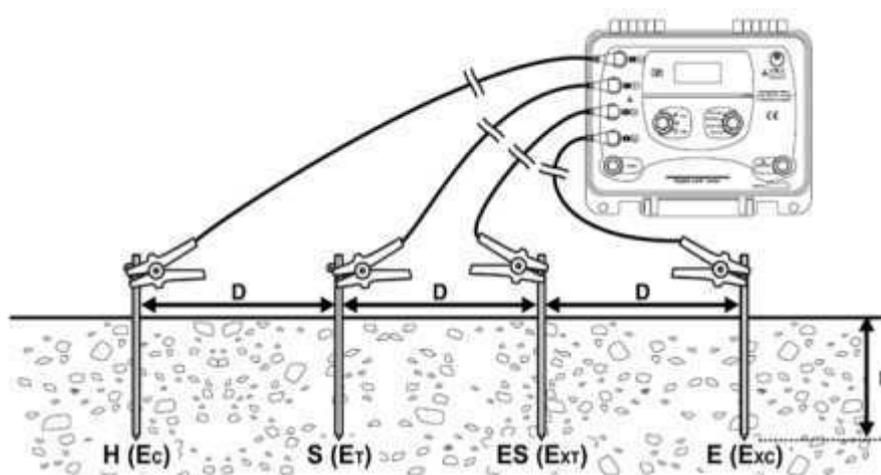
Figura 45 – Terrômetro digital 6472 DA AEMC.



Fonte: adaptado de (TESTEQUIPMENT, 2012).

Considerando o procedimento exposto para medição de resistividade, empregou-se essa técnica durante uma prestação de serviço, que ocorreu em Petrolina, no estado de Pernambuco (PE), com a finalidade de medir a resistividade do solo, no qual será instalado uma subestação. As medições que foram realizadas tiveram a finalidade de averiguar se a malha de aterramento projetada se adequa a resistividade definida do solo. Essa prestação de serviço realizada durante o estágio será descrita a seguir.

Figura 46 – Medição de resistividade com a utilização de um terrômetro.



Fonte: (MEGABRAS, 2008).

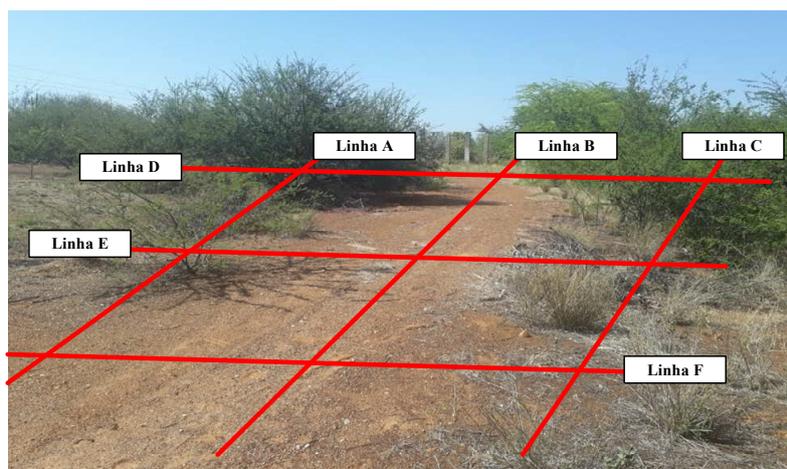
3.9.1 MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE EM PETROLINA-PE

A medição de resistividade do solo se deu em Petrolina - PE, por meio da utilizado do procedimento descrito anteriormente. O terreno da subestação que será implantada no local onde foi realizado a medição ainda não tinha passado pelo processo de terraplanagem e a superfície do solo se encontrava com vegetação e pontos predominante secos.

Em seguida, definiu-se a quantidade de linhas que iriam ser traçadas para realizar a medição. É importante destacar que, a norma (NBR 7117, 2012) recomenda que se efetuem medições de resistividade em, pelo menos, cinco pontos para uma área de até 10.000 m². A área do terreno era de aproximadamente 10.000 m², o que implicaria na realização de, no mínimo, cinco medições. Com a finalidade de averiguar a resistividade em toda a integralidade do terreno, utilizaram-se seis linhas, que corresponde a seis medições. Apresenta-se na Figura 47 o terreno usado para realizar as medições, como também a divisão das linhas que foi adotada.

Para realizar as medições de resistividade do solo, as hastes foram postas numa distância entre si de 1, 2, 4 e 8 m, adotando o centro de cada linha como referência para o início da medição. Apresentam-se, na Tabela 12, os resultados que foram obtidos para cada linha.

Figura 47 – Divisão das linhas para medições de resistividade do solo.



Fonte: próprio autor.

Tabela 12 – Resultados das medições de resistividade do solo em Petrolina-PE.

Distância D (m)	A (m·Ω)	B (m·Ω)	C (m·Ω)	D (m·Ω)	E (m·Ω)	F (m·Ω)	Média (m·Ω)
1	391	294	274	450	273	342	≈ 337
2	320	493	491	405	386	421	≈ 419
4	288	370	418	298	382	340	≈ 349
8	158	173	158	95	153	126	≈ 143

Fonte: próprio autor.

Ao término de todas as medições, verificou-se a média referente a cada distância que foi realizada. Caso a medição de alguma distância ultrapassasse 50 % do valor médio medido, seria preciso refazer a medição para a referida distância. Apresenta-se, na Tabela 13, a porcentagem do valor médio para cada distância. Como pode ser verificado na Tabela 13, nenhum valor ultrapassou 50% do valor médio, sendo válida todas as aferições de resistividade realizadas.

Tabela 13 – Porcentagem do valor médio para cada distância.

Distância D (m)	A (%)	B (%)	C (%)	D (%)	E (%)	F (%)
1	16	13	19	33	19	1
2	24	18	17	3	8	1
4	18	6	20	15	9	3
8	10	20	10	34	6	12

Fonte: próprio autor.

3.10 OUTRAS ATIVIDADES

Além das atividades já apresentadas, durante o estágio supervisionado foram realizadas outras atividades que contribuíram para a formação do estagiário. Dentre essas atividades, destacam-se as apresentadas a seguir:

- ensaios em isoladores de alta tensão;
- participação em curso de NR 10 oferecido pelo LAT;
- montagens de arranjos experimentais para apresentações técnicas realizadas para os alunos no início do curso de graduação em Engenharia Elétrica e visitantes de outras instituições.

4 CONCLUSÃO

Este relatório se propôs a apresentar as atividades realizadas durante o estágio supervisionado, em Engenharia Elétrica, no LAT-UFCG. Durante o estágio supervisionado, foi possível participar de diversas atividades, envolvendo ensaios elétricos (em para-raios de ZnO, equipamentos e ferramentas de linha viva, isoladores etc.), confecção de relatórios, experimentos com um sistema de monitoramento de para-raios de ZnO, campanhas de medição em campo e curso de capacitação. Dessa forma, o estágio possibilitou a realização de um número significativo de atividades relacionadas à área de formação do estagiário.

O estágio supervisionado realizado no LAT contribuiu bastante para o desenvolvimento do caráter prático do aluno, a partir da realização de atividades de acompanhamento e participação de ensaios elétricos, conseqüentemente a elaboração de laudos técnicos, tornando-o capaz de coordenar ensaios do gênero ao longo da vida profissional. Nesse sentido, as contribuições técnicas do estágio para o discente foram: experiência de trabalho em equipe, seja com companheiros de estágio, seja com a equipe de profissionais do laboratório; aprendizado dos procedimentos técnicos adotados para ensaios de tipo em para-raios de ZnO e isoladores; aprendizado dos procedimentos técnicos adotados para realização de ensaios em equipamentos e ferramentas de manutenção de linha viva; procedimentos adotadas para realização de medição da resistividade do solo; elaboração de laudos técnicos; dentre outras.

As atividades realizadas durante o estágio permitiram ao aluno aplicar os conhecimentos adquiridos nas disciplinas de Materiais Elétricos e o respectivo laboratório; Proteção de Sistemas Elétricos; Técnicas de Medição; Instalações Elétricas e o respectivo laboratório; Instrumentação Eletrônica e o respectivo laboratório; Eletrônica e o respectivo laboratório; dentre outras disciplinas. Ademais, o curso de NR 10 foi bastante útil, pois possibilitou ao estagiário uma visão mais crítica quanto aos procedimentos de segurança de trabalho adotados durante a realização dos ensaios elétricos no laboratório. Assim, pôde-se atribuir mais importância às disciplinas cursadas durante a graduação, bem como aos minicursos.

Embora o estágio no LAT seja uma excelente oportunidade, algumas atividades poderiam ser interessantes para formação do discente em Engenharia Elétrica, que não

foram possíveis de realizar no laboratório. Por exemplo, a realização de *networking* com pessoas que poderiam facilitar o ingresso do estudante no mercado de trabalho. Nesse mesmo sentido, como esse tipo do estágio não foi realizado em uma empresa do setor privado, o ingresso no mercado de trabalho pode ser uma dificuldade a ser enfrentada pelo estagiário, visto que o estágio realizado dentro de algum laboratório pertencente à UFCG, mesmo possuindo infraestrutura tecnicamente robusta, pode não ser bem-visto pelas empresas do setor privado.

Por fim, o objetivo principal e os objetivos específicos propostos neste relatório de estágio foram atingidos. Em primeiro lugar, fez-se um planejamento das atividades que deveriam ser realizadas durante o estágio, em conjunto com o orientador e o supervisor do estagiário. Em seguida, as normas, trabalhos acadêmicos e livros, que foram úteis durante os ensaios elétricos realizados no estágio, foram estudados. Uma vez isso feito, diversos ensaios elétricos foram realizados, considerando os ensaios já previstos e outros tipos de ensaios demandados ao longo do estágio. Na sequência, os relatórios técnicos foram elaborados, a fim de consolidar os procedimentos realizados nos experimentos, além de serem aplicados em atividades futuras. Ademais, algumas atividades incrementais foram realizadas, tais como: ensaio com a fonte programável AC e levantamento de equipamentos e instrumentos pertencentes ao LAT.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16295 - Luvas de material isolante**. Rio de Janeiro. 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 2012 - Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo**. Rio de Janeiro. 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8221 - Equipamentos de proteção individual - Capacete de segurança para uso na indústria - Especificação e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro. 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 1991- Transporte aéreo de produtos perecíveis - Requisitos para a embalagem - Especificação**. Rio de Janeiro. 1991.
- ASTM D120. **Standard Practice for Obtaining Spectrometric Data for Object-Color Evaluation**. [S. I.], 2017.
- ASTM F711. **Standard Specification for Fiberglass-Reinforced Plastic (FRP) Rod and Tube Used in Live Line Tools**. [S. I.], 1989.
- ASTM D178. **Standard Specification for Rubber Insulating Matting** [S. I.], 2010.
- BORGES, A. O. et al. **Manutenção de Ferramentas e Equipamentos de Distribuição**. Manual de instruções técnicas da Companhia Paranaense de Energia (COPEL). Curitiba, 2006.
- BARBOSA, V. R. N. et al. **Estudo Comparativo de Técnicas de Monitoramento e Diagnóstico de Para-raios de ZnO Baseadas em Análise Estatística e Inteligência Artificial**. In: 3rd International Workshop on Advanced Dielectrics and Applications (IWADA), 2019, Campina Grande.
- BEZERRA, G. V. N. et al. **Análise de sistemas de aterramento com hastes concretadas submetidos a correntes impulsivas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2017.
- COSTA, E. G. **Análise do Desempenho de Pára-raios de Óxido de Zinco**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande, 1999.
- DOORSAMY, W. & BOKORO, P. **Condition Monitoring of Metal-oxide Surge Arresters using Leakage Current Signature Analysis**. In: 20th International Conference on High Voltage Engineering, 2018.
- DEE. **Laboratório de Alta Tensão – LAT**. Disponível em: <<http://www.dee.ufcg.edu.br/home/infraestrutura/laboratorios-de-pesquisa/laboratorio-de-alta-tensao>>. Acessado em: 09 de novembro de 2019.
- GUPTA, T. K. **Application of zinc oxide varistors**. Journal of the American Ceramic Society, v. 73, n. 7, p. 1817-1840, 1990.
- HINRICHSEN, V. **Monitoring of high voltage metal oxide surge arrester**. In: VI Jornadas Internacionales de Aislamiento Electrico, Bilbao, pp. 22 –23, October 1997.

- HINRICHSEN, V. **Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Power Systems**. Fundamentals. Siemens AG, Erlangen, Germany, 2012.
- IEC 60099-4. **Surge Arresters - Selection and Application Recommendations**. [S.l.], 2014.
- LIRA, G. R. S. **Monitoramento da corrente de fuga em para-raios de óxido de zinco com base na medição da corrente de fuga total**. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, (Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica), 2012
- LIRA, G. R. S. et al. **Sistema de Monitoramento Remoto Baseado na Medição da Corrente de Fuga em Para-raios de ZnO**. In: Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE, 2017, Curitiba.
- KHODSUZ, M. & MIRZAIE, M. **Monitoring and identification of metal-oxide surge arrester conditions using multi-layer support vector machine**. In: IET Generation, Transmission & Distribution, v. 9, n. 16, p. 2501-2508, July 2015.
- MATSUOKA, M. **Nonohmic properties of zinc oxide ceramics**. Jpn. J. Appl. Phys., v. 10, n. 6, pp. 737-746, 1971.
- MACÊDO, E. C. T. **Sistema de avaliação do nível de degradação de para-raios de óxido de zinco**. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica), 2010.
- MEGABRAS. **Manual de uso do terrômetro digital MTD-20KWe**. [S.l.], 2008. Disponível em: <<https://www.megabras.com/pt-br/produtos/terrometro/terrometro-digital-MTD20KWe.php>>. Acesso em 12 de dezembro de 2019.
- MOORE, P. J. **Radiometric measurement of circuit breaker interpole switching times**. IEEE transactions on Power Delivery, v. 19, n. 3, p. 987-992, 2004.
- NOGUEIRA, M. C. & PEZZI, D. C. **A Computação Agora é nas Nuvens**. Universidade de Cruz Alta (UNICRUZ), Cruz Alta, RS, Brasil, 2010.
- SOUZA JUNIOR, H. S. **Simulação, em Ambiente Computacional, do Método de Wenner e Obtenção do Resistência de um Sistema de Aterramento Usando FDTD**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Belém do Pará, 2007.
- SOTILLE, C. A. & HIRAKAWA, W. **Critério para Projetos e Procedimentos para Execuções de Aterramentos de Redes Aéreas e Subestações de Distribuição**. [S.l.], 2008.
- TESTEQUIPMENT. **AEMC 6470-B Multifunction Digital Ground Resistance Tester**. [S.l.] [2012] Disponível em: <<https://www.test-equipment.com.au/aemc-6470-b-multifunction-digital-ground-resistance-tester/>>. Acesso em: 22 de novembro de 2019.
- TAURION, C. **Computação em nuvem: transformando o mundo da tecnologia da informação**. Editora Brasport: Rio de Janeiro, Brasil, 2009..
- VISACRO, S. F. **Aterramentos Elétricos**. [S.l.]: G. Newnes Ltda, 2002.