



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Sistema de Medição de Picos de Corrente de Fuga para
Isoladores de Alta Tensão**

Graziella Bedenik de Oliveira

São Cristóvão, Sergipe, Brasil

Setembro de 2023



Sistema de Medição de Picos de Corrente de Fuga para Isoladores de Alta Tensão

Graziella Bedenik de Oliveira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica – PROEE, da Universidade Federal de Sergipe, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestra em Engenharia Elétrica

Orientador: Elyson Ádan Nunes Carvalho
Co-orientador: Lucas Molina

São Cristóvão, Sergipe, Brasil

Setembro de 2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA-PROEE

TERMO DE APROVAÇÃO

"SISTEMA DE MEDIÇÃO DE PICOS DE CORRENTE DE FUGA PARA ISOLADORES DE ALTA TENSÃO"

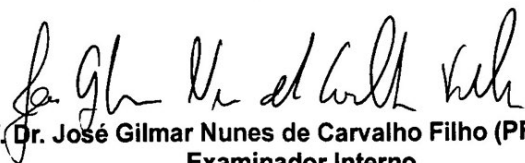
Discente:

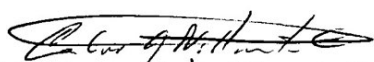
Graziella Bedenik de Oliveira

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Sergipe, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada pela banca examinadora composta por:


Prof. Dr. Tarso Vilela Ferreira (PROEE/UFS)
Presidente


Prof. Dr. José Gilmar Nunes de Carvalho Filho (PROEE/UFS)
Examinador Interno


Prof. Dr. Carlos Alberto Villacorta Cardoso (DEL/UFS)
Examinador Externo


Graziella Bedenik de Oliveira
Candidata

Cidade Universitária "Prof. José Aloísio de Campos", 05 de setembro de 2023.

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

O48s Oliveira, Graziella Bedenik de
Sistema de medição de picos de corrente de fuga para
isoladores de alta tensão / Graziella Bedenik de Oliveira ;
orientador Elyson Ádan Nunes Carvalho. - São Cristóvão, 2023.
61 f. : il.

Dissertação (mestrado em Engenharia elétrica) – Universidade
Federal de Sergipe, 2023.

1. Correntes elétricas. 2. Descargas elétricas. 3. Medição. 4.
Isoladores e isolamentos elétricos. I. Carvalho, Elyson Ádan
Nunes orient. II. Título.

CDU 621.3

*Ao Grupo de Pesquisa em Instrumentação Eletrônica da UFS, que me proporcionou
paixão, teoria e prática para a realização deste e de tantos outros trabalhos que já
passaram e ainda virão.*

Agradecimentos

Tornar-me Mestra em Engenharia Elétrica é mais um degrau escalado na escada das conquistas rumo à realização do sonho que venho buscando nos últimos, aproximadamente, sete anos. Um plano traçado a muitas mãos, com muito zelo e muita disciplina na tomada das melhores decisões para cada momento. Ao mesmo tempo, um plano muito desafiador. As “dores” do amadurecimento intelectual, emocional e físico se tornam menos difíceis de aturar quando me recordo da parceria dos que aqui serão mencionados.

Agradeço a minha família pela motivação e suporte ao longo de toda a minha jornada acadêmica, dos momentos mais leves e simples aos mais carregados e complexos.

Também sou grata a Stéphane pela contribuição intelectual e técnica extremamente fundamental a este e a tantos outros projetos, pela parceria constante, pelo abrigo, pela torcida entusiasmada e, principalmente, por sua amizade - mesmo que nem sempre eu soubesse enxergá-la ou valorizá-la completamente.

Agradeço igualmente a Paulo Gabriel que, mesmo sem saber, injeta doses diárias de confiança no meu subconsciente com seus vocativos especiais. Além disso, pela sua infinita paciência, sua disposição em sempre ajudar os amigos e seu suporte automobilístico ao longo da duração de todo este mestrado.

Agradeço às instituições e órgãos envolvidos no financiamento deste projeto: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Pesquisa & Desenvolvimento do Brasil (INESC P&D Brasil), Eneva S.A. e Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Sem o apoio financeiro recebido ao longo dos últimos meses, não teria sido possível me dedicar exclusivamente à pesquisa de qualidade e ao ensino, o que era meu maior desejo ao ingressar na pós-graduação.

Uma vez mencionado o ensino, não poderia deixar de agradecer aos meus alunos. Estudar, planejar e ensinar foi igualmente desafiador e gratificante - e, justamente pela certeza de que viveria tal necessária e engrandecedora experiência, decidi tocar a primeira etapa da minha pós-graduação na UFS. A “responsabilidade do conhecimento” nunca foi tão real e próxima como no último ano e, ainda assim, os contratempos diversos não foram capazes de ofuscar a realização e vontade de fazer o meu melhor. Vale aqui uma menção honrosa de gratidão a todos do Grupo de Pesquisa em Instrumentação Eletrônica, do Grupo de Pesquisa em Robótica e do Laboratório de Comunicação e Processamento de Sinais da UFS, que não só me fizeram alvo de seu suporte, mas também, por diversas vezes,

confiaram na minha capacidade intelectual e de comunicação para ensiná-los, orientá-los, revisar seus trabalhos ou, simplesmente, para servir de ombro amigo em meio aos desabafos da vida acadêmica.

Na minha escalada rumo a um grande sonho, também sou grata a Taís por seu acompanhamento em relação a minha saúde motora. Sem seu direcionamento, as dores - e as angústias que as acompanham - ainda estariam assombrando minha consciência e minando minha disposição para exercer, finalmente, a profissão pela qual venho me preparando tanto. Não há previsões suficientes para estimar, nem palavras suficientes para agradecer, como sua certa intervenção em minha vida colabora e colaborará com meu bem estar e carreira.

Agradeço também ao meu orientador Lucas pelos decisivos e brilhantes acompanhamento e suporte na realização deste trabalho e suas ramificações. Desde nossos primeiros contatos, ainda na graduação, nunca me senti desamparada em sua presença, independentemente dos momentos complicados da vida. Mais ainda, sou grata pelo seu constante esforço nos últimos anos em me tornar uma pesquisadora mais completa e confiante e uma pessoa mais forte, justa e com expectativas melhor alinhadas à realidade. Nossas discussões mais relevantes não estiveram apenas no domínio da eletrônica, mas também da vida como ela é. Fazer com que saibamos que as pessoas que admiramos também são “gente como a gente” é um dos seus super-poderes e sou grata por poder ter sido alvo do mesmo por diversas vezes na minha jornada. A oportunidade de trabalharmos de forma mais próxima faz com que eu me sinta honrada e espero poder um dia estampar no Universo pelo menos uma fração da marca que em mim foi deixada por essa experiência.

A minha grande pequena trajetória também não estaria completa e jamais teria sido possível senão pela onisciência, onipresença e guia do meu querido orientador da engenharia, da ciência, da vida, Elyson. Nos últimos sete anos, independentemente de todas as minhas (muitas) falhas e recaídas, sempre fui tratada com muito zelo e a mais profunda intenção, ao mesmo tempo em que meu desenvolvimento em todas as esferas possíveis também era observado, cuidado e nutrido. Nos últimos sete anos, fui tratada de forma a tal que só posso me sentir genuinamente amada - como só um verdadeiro pai faz com sua filha querida. Seja em Sergipe ou em Ontário, no tatame ou no laboratório, no caminho do café ou da nave que leva ao altar, seus ensinamentos (os que ele lembra e, principalmente, os que não) ficam armazenados com admitida devoção em cada fibra do meu ser. Sou grata por ter aproveitado ao máximo cada um desses momentos de aprendizado e amizade. Confio, como ele me diz que tem que ser, que esse não é o fim.

Ainda, quero deixar meus agradecimentos a todos os demais amigos, professores, funcionários e colaboradores do PROEE, do DEL e da UFS que fizeram ou fazem parte da minha vida nesses anos universitários. Foi nesse espaço e com essas pessoas que me

encontrei e finalmente me senti à vontade de ser quem eu sou. Talvez demorou, mas final e completamente entendi que quem faz os grandes lugares são grandes pessoas - e aqui é o melhor lugar do mundo para se estar.

Por fim, mas, com certeza, não menos importante, agradeço ao meu rótulo favorito, meu melhor amigo, grande apoiador e contribuinte deste trabalho, meu noivo, Jefferson. Seu amor, crença e apoio transcendem os mais de sete mil e trezentos quilômetros que nos separaram nos últimos anos. Trouxeram e ainda trazem mágica a minha vida. Carregam-me de apreciação a quem sou e busco ser. Saber disso é a razão e motivação para que os processos difíceis sejam mais leves e os prazos apertados sejam possíveis. É o que me faz tomar as grandes decisões com menos aperto no coração. É o que me dá a confiança para um presente bem aproveitado e a certeza para um futuro que mal posso esperar para viver. Sou sempre feliz por Ser no mesmo tempo e no mesmo lugar que você. Obrigada por existir aqui e comigo.

*“The first steps in the path of
discovery, and the first
approximate measures, are those
which add most to the existing
knowledge of mankind.”*

Charles Babbage, *Reflections on
the Decline of Science in
England*, 1830

Resumo da Dissertação apresentada ao PROEE/UFS como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre (Ma.)

Sistema de Medição de Picos de Corrente de Fuga para Isoladores de Alta Tensão

Graziella Bedenik de Oliveira

Setembro/2023

Orientador: Elyson Ádan Nunes Carvalho

Co-orientador: Lucas Molina

A aplicação adequada de instrumentos e técnicas de medição e processamento é essencial para garantir o correto funcionamento e a segurança de sistemas utilizados em diversas aplicações práticas na sociedade, como no fornecimento de energia elétrica. Um fenômeno físico que pode afetar esses sistemas, resultando em picos nos sinais da rede elétrica, é a descarga parcial. Evidências indicam uma relação direta entre a ocorrência de descargas parciais, independentemente de sua fonte, a degradação do desempenho dos isoladores de alta tensão e a manifestação de picos na corrente de fuga medida no isolador. Entretanto, a aquisição e processamento dessas informações são complexos devido a fatores diversos, resultando em lacunas na literatura. A complexidade é acentuada pela falta de atenção a aspectos fundamentais da instrumentação, como a avaliação da adequação dos componentes do sistema de medição à aplicação. Nesse contexto, este estudo visa desenvolver, caracterizar e avaliar um sistema de medição para detectar picos de corrente de fuga em isoladores de alta tensão, abstraindo-se o motivo de sua ocorrência, além de investigar cientificamente os aspectos ligados à medição da grandeza de interesse. Utilizou-se um sensor indutivo para monitorar os picos de corrente no sinal de interesse, que foi gerado artificialmente de forma a permitir a investigação das características do sistema de medição em situações desafiadoras. Resultados dos experimentos de caracterização e uniformidade do sensor permitiram conclusões sobre a configuração experimental, a forma e equacionamento da curva de medição, especificações técnicas do sistema e sua capacidade de lidar tanto com distúrbios na rede elétrica quanto com as componentes de baixa frequência no sinal de corrente de fuga e o momento de ocorrência do pico – todos aspectos comumente ignorados na literatura.

Palavras-chaves: corrente de fuga, descarga parcial, medição de picos, isolador de alta tensão, sensor indutivo.

Abstract of Dissertation presented to PROEE/UFS as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master

Measurement System for Leakage Current Peaks in High Voltage Insulators

Graziella Bedenik de Oliveira

September/2023

Advisor Elyson Ádan Nunes Carvalho

Co-advisor: Lucas Molina

The proper application of measurement instruments and techniques is essential to ensure the correct operation and safety of systems used in various practical applications in society, such as in the provision of electrical power. A physical phenomenon that can affect these systems, resulting in spikes in the electrical network signals, is partial discharge. Evidence indicates a direct relationship between the occurrence of partial discharges, regardless of their source, the degradation of high-voltage insulators' performance, and the manifestation of spikes in the measured leakage current on the insulator. However, the acquisition and processing of this information are complex due to various factors, resulting in gaps in the literature. The complexity is further exacerbated by the lack of attention to fundamental aspects of instrumentation, such as the evaluation of the suitability of the measurement system components for the application. In this context, this study aims to develop, characterize, and evaluate a measurement system for detecting leakage current spikes in high-voltage insulators, regardless of the reason for their occurrence, as well as to scientifically investigate aspects related to the measurement of the quantity of interest. An inductive sensor was developed to monitor the current spikes in the signal of interest, which was artificially generated to allow the investigation of the measurement system's characteristics in challenging situations. Results from the characterization and uniformity experiments of the sensor led to conclusions about the experimental setup, the shape and equation of the measurement curve, the technical specifications of the system, and its ability to handle both disturbances in the electrical network and low-frequency components in the leakage current signal and the timing of the spike occurrence - all aspects commonly overlooked in the literature.

Key-words: leakage current, partial discharge, peak measurement, high-voltage insulator, inductive sensor.

Lista de Ilustrações

Figura 1 – Diagrama de blocos da metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho.	12
Figura 2 – Núcleos magnéticos caracterizados para a primeira etapa do desenvolvimento do indutor. (a) Diagrama de dimensões e (b) núcleos com enrolamentos de $N = 1000$ voltas feitos manualmente.	13
Figura 3 – Circuito utilizado para medição experimental da indutância, evidenciando o modelo do indutor considerado. Adaptado de [1].	14
Figura 4 – Medidas em relação à frequência de (a) permeabilidade magnética e (b) indutância para os núcleos caracterizados. Adaptado de [1].	14
Figura 5 – Configuração experimental simplificada para avaliação da qualidade do sinal e levantamento da resposta em frequência dos indutores utilizados.	15
Figura 6 – Resposta em ganho para diferentes enrolamentos utilizando o primeiro núcleo ($[r1, r2, h] = [23 \text{ mm}, 41 \text{ mm}, 35 \text{ mm}]$). Adaptado de [1].	15
Figura 7 – Filtro passa-altas Butterworth de 4ª ordem com frequência de corte $f_C = 2,5 \text{ kHz}$ utilizado no projeto do sensor. (a) Diagrama elétrico, (b) resposta em ganho e (c) resposta em fase.	16
Figura 8 – Configuração experimental utilizada para a etapa de caracterização dos potenciais indutores do trabalho. (a) Diferentes vistas da maquete para simulação do fenômeno de indução e (b) diagrama de blocos da configuração experimental.	17
Figura 9 – Diagrama de construção do sinal de interesse artificial.	17
Figura 10 – Exemplo do impacto de uma taxa de amostragem inadequada à medida de picos no sinal.	19
Figura 11 – Sinais com 0,5 mA de magnitude do sinal nominal e (a) 0,5 mA e (b) 1 mA de magnitude do pico gerados pelo <i>script</i> em MATLAB.	20
Figura 12 – Sinal de 0,5 mA de nominal e 1 mA de pico fornecido pelo gerador de funções (entrada medida) e tomado no indutor (saída medida) para os osciloscópios disponíveis. (a) Hantek para 1 período, (b) Tektronix para 1 período, (c) Hantek para 4 períodos e (d) Tektronix para 3 períodos.	21
Figura 13 – Sinais com 0,5 mA de magnitude do sinal nominal e (a) 0,05 mA e (b) 50 mA de magnitude do pico fornecidos pelo gerador de funções (entrada medida) e tomados no indutor (saída medida) para o osciloscópio Hantek com 1 período na janela de observação. As linhas tracejadas representam o nível de tensão de 3,5 V.	22

Figura 14	–Sinais de entrada de 2 mA de magnitude do sinal nominal e 10 mA de magnitude de pico no Conjunto 1 do experimento de caracterização (ID 27). (a) Medido no osciloscópio e (b) gerado por <i>script</i> do MATLAB.	24
Figura 15	–Sinais de entrada de 2 mA de magnitude do sinal nominal e 10 mA de magnitude de pico no Conjunto 2 do experimento de caracterização (ID 67). (a) Medido no osciloscópio e (b) gerado por <i>script</i> do MATLAB.	24
Figura 16	–Sinais de entrada de 2 mA de magnitude do sinal nominal e 10 mA de magnitude de pico no Conjunto 3 do experimento de caracterização (ID 107). (a) Medido no osciloscópio e (b) gerado por <i>script</i> do MATLAB.	25
Figura 17	–Sinais de entrada de 2 mA de magnitude do sinal nominal e 10 mA de magnitude de pico no Conjunto 4 do experimento de caracterização (ID 147). (a) Medido no osciloscópio e (b) gerado por <i>script</i> do MATLAB.	25
Figura 18	–Sinais de entrada de 2,75 mA de magnitude do sinal nominal e de magnitude de pico no Conjunto 1 do experimento de uniformidade. (a) Medido no osciloscópio e (b) gerado por <i>script</i> do MATLAB.	26
Figura 19	–Sinais de entrada de 2,75 mA de magnitude do sinal nominal e de magnitude de pico no Conjunto 3 do experimento de uniformidade. (a) Medido no osciloscópio e (b) gerado por <i>script</i> do MATLAB.	27
Figura 20	–Sinais de entrada de 2,75 mA de magnitude do sinal nominal e de magnitude de pico no Conjunto 7 do experimento de uniformidade. (a) Medido no osciloscópio e (b) gerado por <i>script</i> do MATLAB.	27
Figura 21	–Relação entre os picos de corrente na entrada e os picos de tensão na saída do sistema de medição.	29
Figura 22	–Relação entre os picos de corrente na entrada e os picos de tensão na saída do sistema de medição de acordo com a magnitude do distúrbio	30
Figura 23	–Relação entre os picos de corrente na entrada e os picos de tensão na saída do sistema de medição de acordo com a magnitude da componente fundamental do sinal nominal.	31
Figura 24	–Exemplos de aquisições do experimento de uniformidade do sensoriamen- to para (a) Conjunto 1, (b) Conjunto 3 e (c) Conjunto 7.	32
Figura 25	–Exemplos de aquisições já etiquetadas do experimento de uniformidade do sensoriamen- to para (a) Conjunto 1, (b) Conjunto 3 e (c) Conjunto 7.	33
Figura 26	–Histogramas para os dados selecionados do experimento de uniformidade do sensoriamen- to. (a) Conjunto 1, (b) Conjunto 2, (c) Conjunto 3, (d) Conjunto 4, (e) Conjunto 5, (f) Conjunto 6 e (g) Conjunto 7.	34
Figura 27	–Relação entre magnitude dos picos de corrente da entrada ideal e da entrada medida.	36
Figura 28	–Detalhe da região em que pode ser encontrado o valor de I_{pico} utilizado na investigação da uniformidade do sensoriamen- to.	37

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Dimensões dos núcleos magnéticos utilizados na primeira etapa de desenvolvimento do trabalho	13
Tabela 2 – Especificação de cada conjunto de experimentos para a caracterização .	22
Tabela 3 – Exemplo de combinações utilizadas para gerar as IDs para o experimento de caracterização	23
Tabela 4 – Especificação de cada conjunto de experimentos acerca da uniformidade do sensoramento	25
Tabela 5 – Coeficientes das retas modeladas para cada magnitude de distúrbio (conjunto) dos experimentos de caracterização	30
Tabela 6 – Coeficientes das retas modeladas para cada magnitude ideal de corrente do sinal nominal dos experimentos de caracterização	31
Tabela 7 – Métricas dos histogramas resultantes da análise de uniformidade do sensoramento para cada conjunto dos experimentos	35

Sumário

Lista de Ilustrações	I
Lista de Tabelas	III
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	5
1.1.1 Objetivos Específicos	5
1.2 Estrutura do Trabalho	6
2 Revisão Bibliográfica	7
3 Desenvolvimento do Trabalho	12
3.1 Projeto e Estudo do Sistema de Medição	12
3.2 Procedimentos para Geração e Aquisição dos Dados	17
3.3 Caracterização do Sistema de Medição	21
3.4 Uniformidade do Sensoriamento	24
4 Resultados e Discussão	28
4.1 Característica e Equação da Curva de Medição	28
4.2 Limites de Operação do Sistema de Medição	29
4.3 Invariância à Magnitude do Distúrbio	30
4.4 Invariância à Magnitude da Nominal	31
4.5 Invariância ao Tipo de Distúrbio e Instante de Ocorrência dos Picos	31
5 Conclusões	38
Referências	40

1 Introdução

A detecção e o sensoriamento de picos em sinais elétricos é uma linha de desenvolvimento e pesquisa com aspectos interessantes tanto do ponto de vista científico quanto técnico. De maneira geral, os picos podem ser diretamente associados a algum fenômeno físico, como descargas elétricas, relâmpagos, explosões solares, raios cósmicos e demais interferências eletromagnéticas [2]. Sendo assim, a detecção das anomalias no sinal é uma rota de exploração fundamental das fontes de tais fenômenos, deixando mais clara a interação entre o mundo natural e os sistemas elétricos. Para tal, é importante que inovações tecnológicas na instrumentação sejam desenvolvidas e estudadas para possibilitar a medição e o processamento dessa informação.

O emprego adequado dos instrumentos e técnicas de medida e processamento garante o bom funcionamento e a segurança de sistemas para diversas aplicações tangíveis à sociedade [3, 4]. Por exemplo, tanto em equipamentos médicos de monitoramento dos sinais vitais de um paciente em estado grave quanto na estabilização da saída de sistemas de áudio, busca-se evitar grandes flutuações no sinal que alimenta os equipamentos. Logo, o sensoriamento de picos de corrente no sistema elétrico de energia contribui para que essas e inúmeras outras aplicações procedam de maneira confiável. Um dos possíveis fenômenos físicos que se traduz em forma de picos nos sinais advindos da rede elétrica é a descarga parcial. Apesar de costumeiramente entendida como uma ocorrência interna a elementos instalados ao longo da linha de transmissão, também é observada em diferentes intensidades na superfície dos mesmos [5].

Nesse sentido, os isoladores de alta tensão demandam atenção. Fabricados em material dielétrico, são fundamentais nos sistemas de transmissão de energia em alta tensão, pois não só proporcionam sustentação mecânica aos cabos do sistema, como também isolam ou evitam a interação entre potenciais elétricos do próprio sistema ou advindos de fontes externas. Uma vez que seu bom funcionamento é crítico para a continuidade e segurança no fornecimento de energia elétrica, danos às propriedades dos isoladores podem prejudicar a confiabilidade da rede [6, 7].

Em paralelo, os isoladores apresentam as maiores taxas de falha dentre os elementos da rede elétrica [6, 8, 9]. Devido à ausência de um material dielétrico perfeito, sempre há uma mínima corrente de condução residual indesejada nos isolamentos, conhecida como corrente de fuga [10]. Além disso, eles estão expostos a condições climáticas adversas, como umidade, radiação solar, resíduos químicos e sais [7, 8, 11]. A deposição desses poluentes

forma uma camada de contaminação nos isoladores que aumenta a condutividade na sua superfície, causando crescimento tanto da amplitude quanto da distorção da corrente de fuga do isolador.

Apesar de o valor máximo da corrente de fuga em cada um dos isoladores estar em torno de alguns miliampères, a presença de inúmeros isoladores em cada linha de transmissão pode levar a uma corrente de fuga total elevada no sistema, ativando dispositivos de proteção [12]. A diminuição no desempenho dos isolamentos aumenta de acordo com a ocorrência das descargas parciais até o rompimento da rigidez do dielétrico, ocorrendo o fenômeno denominado de *flashover*. Essa é justamente uma das causas mais comuns para as falhas nos isoladores de alta tensão [7, 9, 11, 13–15]. Interrupções não planejadas na rede elétrica para manutenção corretiva dessas ocorrências geram prejuízos financeiros e operacionais tanto para as empresas de distribuição quanto para os clientes [8, 11, 12]. Quando há comprovação de falhas por falta de manutenção, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), de acordo com a Resolução número 846 de 11 de junho de 2019, aplica as devidas multas às concessionárias de energia - que podem chegar a vários milhões de reais, enquanto que o custo de substituição dos isoladores não chega nem a 5% da despesa total do projeto de transmissão [11].

Portanto, o nível de degradação dos isolamentos impacta diretamente na confiabilidade, segurança e custo-benefício dos sistemas elétricos de alta tensão [7, 14, 16]. Naturalmente, a previsão e prevenção da ocorrência de episódios corretivos se torna um tópico de importância na literatura técnica e científica relacionada [6, 11, 14]. Especialmente em zonas costeiras, onde a exposição à poluição salina é alta e os *flashovers* são mais prováveis, o interesse das empresas na busca por soluções de manutenção preventiva é ainda maior [7, 8, 12, 17–19].

A lavagem periódica das cadeias de isoladores é uma prática comum para amenizar o problema. Esse processo precisa ser realizado por mão de obra especializada, pois, comumente, o sistema permanece ligado durante esse tipo de manutenção, tornando-se bastante custoso [6]. Além disso, é comum que não se leve em consideração a poluição real do isolador, mas sim a experiência humana. Consequentemente, os ciclos de lavagem podem ocorrer tanto quando a poluição não é significativa quanto quando já afeta a confiabilidade do sistema [16, 19].

Por outro lado, a quantificação de tal confiabilidade ainda é majoritariamente realizada após a desconexão dos isoladores da rede elétrica. As técnicas consideradas como o padrão ouro para aferir o nível de contaminação dos isolamentos não são capazes de realizar o monitoramento de sua degradação em tempo real, o que traria informações importantes a respeito da severidade da poluição do local [7, 8, 16]. Tal parâmetro auxilia no estabelecimento de processos adequados de manutenção preventiva e na implantação de

intervenções efetivas contra a contaminação [16], melhorando a confiabilidade das linhas de transmissão de energia e contribuindo com a redução do risco de *flashovers* por deposição de poluentes [7, 14].

Devido a essa importância, nas últimas décadas, alternativas para monitoramento em tempo real da contaminação e degradação de isoladores de alta tensão têm sido alvo de grandes estudos patrocinados por concessionárias e instituições governamentais ligadas ao setor de energia [12, 17, 18, 20]. No entanto, a identificação dos danos apresenta desafios, pois fissuras e rachaduras são difíceis de detectar por meio de inspeções visuais [21]. A constatação do mau funcionamento pode ocorrer apenas em situações críticas, como um aumento na umidade relativa do ar, resultando em alta condutividade superficial nos componentes e, eventualmente, falhas no fornecimento de energia elétrica [22]. Uma vez que a medição direta da contaminação é de difícil obtenção, outras grandezas físicas são relacionadas à quantificação do fenômeno, como a própria corrente de fuga [8, 23]. Esse é considerado o método mais promissor entre os já propostos, pois pode possibilitar a realização de medições contínuas sem afetar a integridade dos isoladores. Além disso, a corrente de fuga mantém uma associação clara com a ocorrência dos *flashovers* [7, 14, 16].

Mesmo havendo certo consenso, adquirir e utilizar a informação presente no sinal de corrente de fuga para monitoramento dos isolamentos representa um problema complexo e ainda não superado [19]. Primeiro, diferentes componentes de frequência parecem carregar diferentes tipos de informação que podem ser associadas ao mesmo processo de degradação do isolador [18, 24, 25]. Segundo, o espaço das subestações é inóspito para grande parte da circuitaria comumente utilizada nos sistemas eletrônicos. Há grandes variações das intempéries ambientais e seus impactos nos isolamentos, além da alta interferência eletromagnética do ambiente e do cuidado que se deve ter para evitar a inserção de cargas externas na rede elétrica. Terceiro, uma grande variedade de princípios de medição e de técnicas de processamento pode ser combinada para adquirir e utilizar a informação contida no sinal de corrente de fuga [25]. A decisão a respeito das melhores estratégias e abordagens só pode ser feita a partir do conhecimento e análise crítica das vantagens e desvantagens de cada método e ainda representa uma lacuna na literatura [7, 9, 14].

Ainda que a escolha do sensor mais adequado para a aplicação fosse superada, pode-se observar que o problema completo (desde o sensoriamento até o uso da informação para a tomada de decisões de manutenção) é complexo. Nesse sentido, provavelmente na tentativa de simplificá-lo, estabeleceram-se na literatura abordagens com uso exaustivo de apenas uma técnica para processar o sinal de corrente de fuga, a análise das harmônicas ímpares. Ao rejeitar a informação contida em outras características do sinal, como os picos de corrente associados a descargas parciais na superfície do isolador [18, 24, 25], tal tendência acaba minimizando a possibilidade de encontrar trabalhos que investiguem o

uso isolado ou com redundância de demais técnicas na análise da corrente de fuga medida em isoladores de alta tensão. A investigação, validação e aplicação conjunta de outras técnicas pode ser um fator de aumento da robustez nos sistemas para esse fim [25].

Assim, a pesquisa em tecnologias de sensoriamento e análise de corrente de fuga é crucial para a eficiência operacional do sistema elétrico [19] e de todas as outras aplicações que dependam do mesmo. A capacidade de identificar adequadamente as falhas se torna característica chave de um sistema de instrumentação para tal [6], mas se deve considerar que a complexidade do problema demanda o uso de abordagens robustas e integradas [9, 14, 25]. Entretanto, de maneira geral, há um foco inflamado na literatura no processamento dos sinais de corrente de fuga em detrimento do próprio processo de medição para adquiri-los, havendo uma lacuna a respeito do desenvolvimento e validação das tecnologias e métodos de medição.

Dessa forma, neste trabalho de mestrado, buscou-se realizar não só o desenvolvimento de um sistema de medição, mas também uma investigação mais aprofundada acerca do próprio processo de medição da corrente de fuga e da adequação da medida obtida à aplicação. A análise dos picos de corrente foi empregada por apresentar evidências promissoras a respeito de sua confiabilidade para estabelecimento de manutenções preventivas [18, 24] e economia de recursos como memória e tempo de processamento [25], apesar de ser pouco explorada na literatura. Um dos desafios dessa abordagem está justamente no sensoriamento, pois normalmente as componentes em maiores frequências são indesejadas e eliminadas nos sensores comerciais mais utilizados através de processos de filtragem. Para habilitar tal análise, foi empregado o princípio de sensoriamento indutivo por meio de transformador de corrente (TC), que possibilita uma medição sem contato e conservação da integridade do isolador e da linha de transmissão, possuindo ainda simplicidade de operação, alta sensibilidade, boa durabilidade em campo e possibilidade de manipulação de sua resposta em frequência [26].

Antes de iniciar as discussões relacionadas, é importante que se dê destaque a um breve “glossário” de definições chave que serão utilizadas ao longo deste texto, visando a desambiguidade e uniformização dos termos. Assim, no escopo deste trabalho:

- O termo “sinal nominal” se refere às componentes de menores frequências do sinal de interesse, ou seja, à onda com frequência fundamental de 60 Hz e suas harmônicas ímpares, até a 9ª;
- O termo “pico” se refere às componentes de maiores frequências do sinal de interesse, ou seja, a aumentos de tensão/corrente rápidos, agudos e de magnitude significativa em relação ao sinal nominal;

- O termo “descarga parcial” se refere ao conjunto de fenômenos ou alterações físicos causadores de picos no sinal de interesse, independentemente do mecanismo físico que a originou. Esses podem ser descargas parciais internas ao isolador, descargas parciais superficiais ao isolador e o efeito corona [5];
- O termo “distúrbio” se refere a aumentos de tensão/corrente rápidos e que ocorrem ao longo de toda a variação no tempo do sinal, representando descargas parciais de baixa magnitude e também o ruído advindo de diversas fontes;
- O termo “sistema de medição” se refere ao conjunto formado pelo TC e o circuito eletrônico desenvolvido;
- O termo “sensor” se refere ao elemento que se modifica ou sofre efeito de algum fenômeno físico para realizar a medida, e.g., o TC.

Este trabalho é parte do projeto de pesquisa e desenvolvimento “GImpSI – Gestão dos Impactos da Salinidade em Isolamentos”, financiado pela Eneva no âmbito do Programa de P&D ANEEL (Código ANEEL: PD-11278-0001-2021), e gerido pelo INESC P&D Brasil.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver e caracterizar um sistema de medição de corrente de fuga em isoladores de alta tensão capaz de identificar picos de corrente causados por descargas parciais.

1.1.1 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo desta dissertação, são elencados os seguintes objetivos específicos:

- Realizar uma ampla revisão bibliográfica acerca das técnicas e sistemas de instrumentação para isoladores de alta tensão;
- Projetar, construir e caracterizar o indutor;
- Projetar e implementar o circuito do filtro;
- Definir e investigar procedimentos de geração e aquisição do sinal com base nas informações encontradas na literatura;
- Definir a configuração experimental mais adequada para a realização dos experimentos;
- Projetar e executar experimentos para caracterizar e avaliar o sistema;

- Analisar os resultados obtidos, definindo as especificações técnicas do sistema e discutindo acerca de sua usabilidade e adequação.

1.2 Estrutura do Trabalho

Esta dissertação está estruturada da seguinte maneira: no capítulo 2, é apresentado um apanhado acerca da literatura relacionada ao trabalho; no capítulo 3, é apresentado o desenvolvimento do trabalho e feita a discussão principal a respeito do processo de medição, enquanto que, no capítulo 4, trata-se da apresentação e discussão dos resultados dos experimentos realizados. Por fim, a conclusão é apresentada no capítulo 5.

É importante frisar que este texto não apresenta um capítulo ou seção isolados de fundamentação teórica. Por questão de objetividade na comunicação científica relacionada ao trabalho, os conceitos necessários para o seu desenvolvimento são suficientemente apresentados de acordo com a demanda ao longo do texto, sendo as devidas referências apresentadas logo em seguida.

2 Revisão Bibliográfica

O problema do monitoramento em tempo real da degradação de isolamentos tem sido bastante investigado durante os últimos anos. É possível encontrar trabalhos relacionados averiguando diferentes técnicas de sensoriamento de corrente de fuga desde a década de 90 [18, 27–29]. Vê-se que o desenvolvimento desse tipo de sistema é ancorado na possibilidade de otimização das manutenções preventivas nos isolamentos e, consequentemente, na economia de recursos e prevenção de falhas [9, 18, 30–32]. Esse fator parece ser ainda mais relevante para aplicações em subestações de energia e linhas de transmissão situadas em zonas costeiras [12, 17, 24, 29, 33–35], como é o caso da UTEPS I (Usina Termoeletrica Porto de Sergipe I), de propriedade da Eneva S.A. e localizada no município da Barra dos Coqueiros, Sergipe.

São diversos os princípios físicos aplicados nessa tentativa de quantificar o desempenho dos isolamentos. É comum a medição de grandezas elétricas e magnéticas relacionadas [23, 36], como campo elétrico [37] e condutividade [27], mas métodos alternativos incluem ainda radiometria de microondas [8], processamento de imagens [21, 38], ultrassom [6] e outras ondas acústicas [39]. Apesar disso, a corrente de fuga é, indiscutivelmente, a grandeza mais utilizada para a aplicação e considerada a mais capaz de fornecer uma descrição mais abrangente sobre o estado dos isoladores [14, 32]. Os principais princípios físicos utilizados para sua medição são resistivo, óptico e indutivo, enquanto que os métodos de processamento podem ser encarados como o trabalho com componentes de menor frequências, usando variações da análise de harmônicas, ou de maior frequência, usando variações da análise dos picos.

Por exemplo, vê-se frequentemente o emprego da análise das harmônicas ímpares do sinal de corrente de fuga que passa por um resistor *shunt* [8, 22, 32, 34, 40–42]. Apesar de o procedimento ser bastante simples e reproduzível, a técnica é aplicada estritamente em cenários de laboratório por demandar abertura do circuito, o que poderia causar disrupções no aterramento.

Já a investigação com sensores ópticos é mais recente, rendendo resultados consistentes com diferentes técnicas de análise e processamento de dados tanto em ambientes simulados como em campo [12, 24, 30, 43]. Embora esse princípio apresente boa imunidade aos efeitos magnéticos da subestação (um dos problemas de medição elétrica de baixa magnitude na presença de altas tensões), sua instalação pode causar intervenções no isolador e a aquisição pode ser afetada pela influência de variáveis que interferem na propagação da luz.

Uma outra alternativa explorada em combinação com diferentes métodos de análise do sinal são os sensores indutivos, representados pelos TCs e bobinas de Rogowski. Os sensores indutivos são pouco influenciados pelas intempéries e possibilitam uma medição sem contato, mantendo a integridade dos isoladores e da rede [9, 18, 44–46]. Entretanto, justamente por funcionarem a partir do princípio da tensão induzida, são altamente sensíveis aos campos eletromagnéticos presentes no ambiente da subestação ou linha de transmissão e podem demandar desligamento temporário da rede para sua instalação.

Vê-se que existe uma variedade considerável de possibilidades e riqueza na discussão relacionada ao sensoriamento da corrente de fuga. Todavia, não são poucos os trabalhos encontrados na literatura que sequer mencionam qual o princípio físico é utilizado para a medição da grandeza, como acontece em [17, 19, 20, 29, 31, 33, 47–50]. Há ainda casos em que o princípio é até mencionado, mas não são discutidas suas especificações nem ao menos as características relacionadas ao processo de medição, vide [14, 51–54], dificultando a reprodutibilidade e verificação das metodologias e resultados apresentados.

A problemática é tão generalizada nessa área de pesquisa que a revisão apresentada em [25], de título traduzido para o português como “Medição e Análise de Corrente de Fuga para Isoladores e Elementos Externos”, não aborda em momento algum o termo “sensor” ou similares. A categorização dos trabalhos revisados é feita em cinco diferentes grupos, com quinze subcategorias depois analisadas em maior detalhe, e nenhuma trata dos princípios de medição utilizados. Percebe-se que o foco científico vai na direção do uso de equipamentos e sistemas comerciais, possibilitando empregar esforços no estudo do processamento da informação, em detrimento da investigação a respeito do desenvolvimento e avaliação da adequação dos sistemas de medição à aplicação. No entanto, de nada valem os empreendimentos de análise e processamento se a informação adquirida e utilizada é intrinsecamente errada.

Assim, uma vez que se nota a dificuldade em encontrar trabalhos com escopo sobreposto ao deste mestrado, a seguir, apresentam-se e se discutem alguns dos trabalhos encontrados na literatura que chamam atenção em relação ao pontos abordados anteriormente. Diversos desses trabalhos são referências-âncora da literatura relacionada à medição e análise de sinais de corrente de fuga.

Um dos primeiros trabalhos a se dedicar ao estudo das características da corrente de fuga em isoladores para fins de manutenção preventiva é apresentado em [18] e continuado em [28]. São realizados testes em laboratório com resistor *shunt* para investigar o comportamento da corrente de fuga em diferentes tipos de isoladores e condições de deposição de poluentes e, assim, propor um método para aplicação real. A versão final do sistema utiliza um TC com núcleo de alta permeabilidade magnética como sensor, sendo realizados testes comparativos entre os dois princípios de medição. São apresentados pontos relevantes sobre as relações de causa e efeito que, muitas vezes, são negligenciados ou não

comentados no desenvolvimento de métodos de análise mais recentes - principalmente aqueles baseados em inteligências artificiais para reconhecimento de padrões no sinal. Diferentemente da maioria dos trabalhos da área, também é observada uma discussão a respeito da eletrônica utilizada no sistema e das características do processo de medição. A partir dos resultados, propõe-se uma correlação associando quantidade de picos de corrente de diferentes magnitudes e a eminência de um *flashover*. Também é trazida uma análise sobre a melhora da previsibilidade de manutenção preventiva quando o monitoramento se inicia desde a instalação dos isolamentos e em conjunto com outros métodos.

Já em [51–53], os autores conduzem uma série de pesquisas envolvendo o monitoramento de diferentes tipos de isoladores. O foco é dado ao processamento considerando o uso de redes neurais com diferentes tipos de treinamento para realizar a predição da evolução temporal das características do sinal de corrente de fuga. Todos os dados e experimentos são realizados em ambiente controlado - o que coloca em cheque a generalização da ferramenta proposta. Para tal, as medidas são tomadas por meio de resistores *shunt*. Apesar de a predição apresentar erro máximo de 5%, a falta de discussão a respeito da configuração experimental utilizada levanta questionamentos quanto à capacidade de utilização dessa solução em ambientes reais.

Em [32] e [40], a medição por resistor *shunt* também é utilizada, tanto para isoladores novos como naturalmente poluídos. A partir da análise dos resultados, apresenta-se forte correlação entre a forma de onda e a distorção harmônica total do sinal de corrente de fuga com o grau de degradação natural do isolador. Mais uma vez, os autores utilizam redes neurais, agora para identificar e classificar os isoladores em diferentes níveis de degradação. É mostrado que esta é mais fortemente percebida pela informação contida nas harmônicas ímpares e, especialmente, na razão entre as terceira e quinta harmônicas. O uso exclusivo da informação contida nas componentes de menores frequências do sinal de corrente de fuga para determinação da degradação do isolador, independentemente do princípio físico do sensoramento, é também empregado em [9, 15, 22, 34, 41, 42, 46, 54–57].

Em [54], apesar dos resultados promissores, os dados foram coletados em laboratório utilizando um sistema de medição que não é reproduzível para medição em equipamentos de alta tensão em funcionamento. Ainda, o processo de conversão da medição em valor real estimado de corrente de fuga foi negligenciado, sem informações associadas ao processo de identificação, considerando a tarefa de aquisição da informação como sendo trivial, o que não é necessariamente uma verdade. Nenhuma indicação de outro sistema de medição para utilização em situações reais foi proposto e, apesar de associar medida de corrente com poluição artificialmente controlada, não há implicações claras para o fenômeno de *flashover* ou associações claras com o processo de manutenção preventiva. Essa tendência não é exclusiva desse trabalho, sendo prática comum na literatura relacionada que, em ambiente

de laboratório, independentemente dos métodos de sensoramento e de processamento, os sinais sejam adquiridos através dos osciloscópio utilizados para visualização dos dados [32, 40, 45].

Em contrapartida, em [56], é apresentada uma boa discussão acerca do processo de medição de corrente de fuga em laboratório. Os autores alegam que a análise de magnitude não é eficiente para o diagnóstico do isolador, contrariando grande parte dos trabalhos já apresentados na área. Além disso, é proposta uma outra forma de quantificar e diagnosticar a qualidade dos isoladores que é baseada em análise de fase entre o sinal de corrente de fuga e o sinal de excitação à qual o isolador está sujeito. A configuração experimental utilizada não é reproduzível *in loco*, o que compromete a utilização dessas medidas. No entanto, caso exista uma medida prévia de valores de tensão da rede, um sistema qualquer de medição de corrente de fuga pode ser utilizado e a técnica proposta pode ser adaptada para utilização na aplicação.

Em especial, em [9], os autores apresentam o desenvolvimento de um sistema de monitoramento em que o elemento sensor é um TC. A principal justificativa é a capacidade de medir sem contato com a cadeia de isoladores, prezando por sua integridade. O sensor é constituído de um núcleo de liga *supermalloy*, com altíssima permeabilidade magnética quando comparados a núcleos tradicionais de ferrite ou ferro em pó, e de um enrolamento de cobre com 8000 voltas. Ambas as características conferem maior sensibilidade ao sistema de medição, cujos dados são empregados em uma análise simples de distorção das harmônicas da corrente de fuga adquirida. Há um grande cuidado com os aspectos relacionados à construção, modelagem e avaliação do sensor e à reconstrução do sinal medido, sendo estabelecida a relação entre a tensão de saída do sistema e a corrente que se quer medir para experimentos realizados em campo. Contudo, fala-se pouco sobre o sistema de aquisição, processamento e transmissão dos dados - e muito menos sobre sua adequação à aplicação. TCs também são utilizados, acompanhados de uma maior pobreza descritiva dos aspectos relevantes à instrumentação, em [44–46].

Já em [24] e [30], os autores apresentam, respectivamente, o desenvolvimento e validação de um sistema de medição composto por um sensor baseado em fibra óptica e um módulo de processamento embarcado. O sensor é conectado diretamente aos isoladores por um mecanismo simples, sendo capaz de amostrar a forma de onda da corrente de fuga e a enviar para o módulo por meio de um *link* óptico. Testes são realizados em laboratório e em subestações em regiões costeiras para determinar a funcionalidade do sistema no quesito manutenção preventiva. Os resultados indicam que a adequação para determinação do grau de poluição de isoladores está relacionada tanto com a forma de onda da corrente de fuga quanto com a detecção e classificação das magnitudes dos picos no sinal. Correlações

entre umidade, corrente de fuga e ocorrência de *flashover* são apresentadas e os resultados também indicam que uma medição de picos a partir de 1 mA é suficiente para utilização como indicação de manutenção preventiva.

Em [12], também é apresentado um sistema de medição utilizando princípio óptico. Um LED emite luz modulada a partir da amplitude da corrente de fuga que passa no isolador, e o sinal codificado é transmitido por fibra óptica para uma unidade de processamento. Testes *in loco* mostram que a corrente de fuga varia consideravelmente ao longo do dia com a temperatura, mas numa ordem de grandeza não crítica para aplicações de manutenção preventiva. As medidas são feitas com boa precisão e estudos de calibração do processo de medição são apresentadas.

De acordo com o que foi possível observar ao longo do desenvolvimento deste trabalho, há um conjunto significativo de evidências a respeito dos fatores causadores de descargas parciais em isoladores, seu impacto no sinal de corrente de fuga e a correlação dessa informação com os picos presentes no sinal e o acontecimento de *flashovers*. Dessa forma, este trabalho de mestrado aceita tais premissas e se preocupa com investigações mais profundas acerca tanto do desenvolvimento de um sistema de medição quanto da caracterização dos processos para medir tal informação - o que, como notado, é comumente negligenciado na literatura relacionada.

3 Desenvolvimento do Trabalho

Neste capítulo, é apresentado o desenvolvimento do trabalho, que envolveu a construção e estudo do indutor, o projeto e implementação do filtro ativo, a determinação dos procedimentos de geração e aquisição de dados, e a realização de experimentos para caracterização do sistema e investigação da uniformidade do sensoramento. Tais etapas foram realizadas conforme o diagrama de blocos da figura 1.

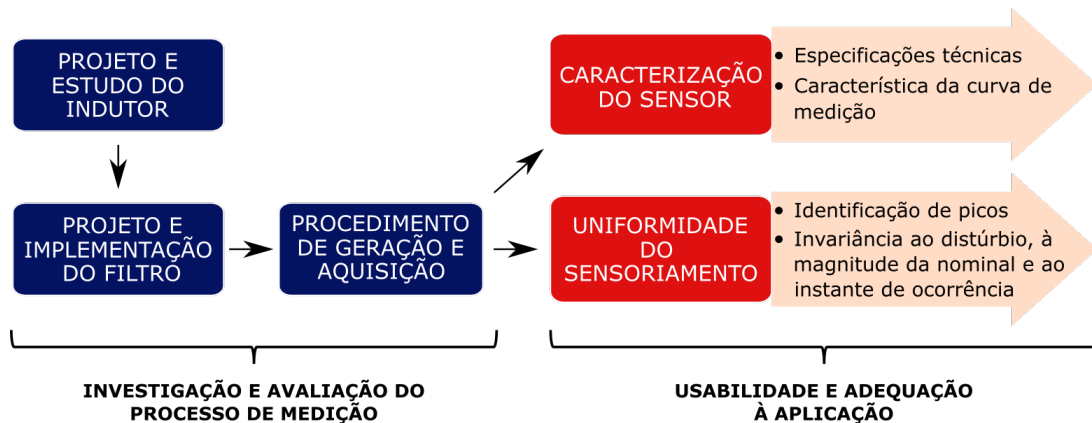


Figura 1 – Diagrama de blocos da metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho.

É possível observar a divisão das etapas do desenvolvimento em dois grupos: a investigação e avaliação do processo de medição e a análise da usabilidade e adequação à aplicação. Ambas as categorias têm o intuito de apresentar e discutir acerca de processos negligenciados pela literatura, como posto no capítulo 2. Tais processos e cada uma das etapas da metodologia desenvolvida serão melhor abordados nas seções a seguir.

3.1 Projeto e Estudo do Sistema de Medição

Uma vez escolhido que o princípio de medição da corrente utilizado neste trabalho seria o indutivo, fez-se necessário o estudo, construção e caracterização do TC a ser empregado. Sabendo-se que as magnitudes típicas do sinal de corrente de fuga são pequenas (< 10 mA para a componente de menor frequência, e < 100 mA para os picos), optou-se por um núcleo de liga nanocristalina, composto por grãos da fase Fe(-Si) em escala nanométrica - o que justifica sua nomenclatura. A escolha desse elemento foi motivada por vantagens como as altas permeabilidade, estabilidade magnética e densidade de fluxo magnético [58, 59], o que possibilita melhor qualidade e, conseqüentemente, visualização do sinal medido.

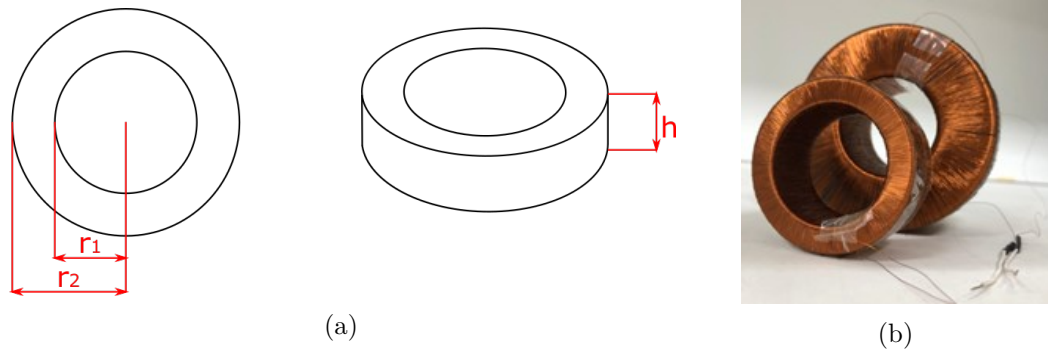


Figura 2 – Núcleos magnéticos caracterizados para a primeira etapa do desenvolvimento do indutor. (a) Diagrama de dimensões e (b) núcleos com enrolamentos de $N = 1000$ voltas feitos manualmente.

Foram utilizados dois núcleos toroidais de liga nanocristalina (*MMT521T82.46.35R* e *MMT521T50.40.20B*, Magmattec, Brasil), adquiridos visando desenvolver a solução buscada no projeto GImpSI, com dimensões conforme diagrama da figura 2 e a tabela 1, sendo ambos os enrolamentos compostos por $N = 1000$ voltas e feitos manualmente com fio de cobre esmaltado AWG 36.

Tabela 1 – Dimensões dos núcleos magnéticos utilizados na primeira etapa de desenvolvimento do trabalho

Núcleo	r_1 (mm)	r_2 (mm)	h (mm)
1	23	41	35
2	20	25	20

A caracterização foi feita com relação à indutância (L) e permeabilidade magnética (μ) dos elementos. Isso porque tais grandezas são representativa das propriedades magnéticas e desempenho dos elementos para a finalidade desejada. Ainda, uma vez que se sabe que a resposta do núcleo nanocristalino varia com a frequência da entrada aplicada [60], espera-se o mesmo comportamento para a resposta em frequência do sensor desenvolvido.

São diversas as formas de se estabelecer experimentalmente o valor de L e, assim, de μ [61, 62]. Dessa forma, foram estudados os métodos e as equações que regem o funcionamento dos indutores para possibilitar o desenvolvimento de uma metodologia experimental própria e a correta interpretação dos seus resultados. Os métodos são melhor detalhados na publicação relacionada, em [1].

De forma breve, cada indutor compõe um circuito RL série excitado com determinada tensão AC e frequência na entrada, conforme o esquemático da figura 3. Ajustes são feitos no resistor para que a saída em tensão tomada no indutor represente uma configuração de ressonância.

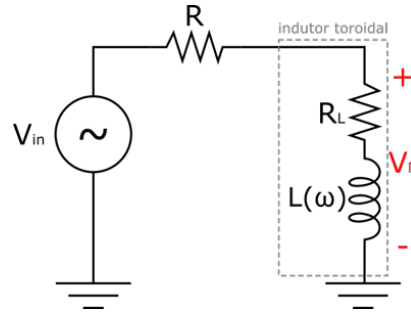


Figura 3 – Circuito utilizado para medição experimental da indutância, evidenciando o modelo do indutor considerado. Adaptado de [1].

O sinal de entrada senoidal com $10 V_{PK}$ foi gerado por gerador de função (*MFG-4225*, Minipa do Brasil Ltda., Brasil)¹. As medições da tensão de entrada e tensão no indutor foram feitas utilizando osciloscópio digital (*TBS 1000C Series*, Tektronix Inc., EUA)¹ e as de resistências, por multímetro digital (*115 True-RMS*, Fluke Corporation, EUA).

As curvas de permeabilidade e indutância obtidas para os dois núcleos, ambas com relação à frequência, podem ser vistas na figura 4. O número diferente de amostras e as diferentes frequências de avaliação para cada núcleo se devem a particularidades do processo experimental, em que nem sempre foi possível obter uma saída com excursão mensurável.

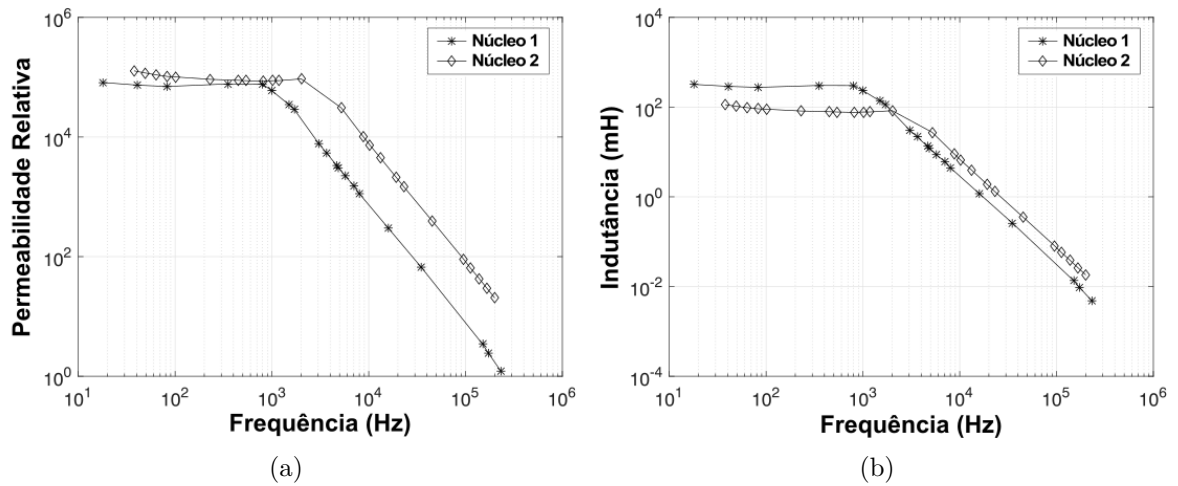


Figura 4 – Medidas em relação à frequência de (a) permeabilidade magnética e (b) indutância para os núcleos caracterizados. Adaptado de [1].

Tratando da aplicação clássica de sensoriamento de corrente de fuga, em que as componentes mais importantes do sinal são a fundamental em 60 Hz e a terceira e quinta harmônicas, o desempenho de ambos os núcleos é similar e satisfatório. Já se tratando da componente de maior frequência (de até cerca de 250 kHz [46]), há uma pequena diferença

¹ Equipamento adquirido com recursos do projeto de pesquisa e desenvolvimento "GImpSI – Gestão dos Impactos da Salinidade em Isolamentos", financiado pela Eneva no âmbito do Programa de P&D ANEEL (Código ANEEL: PD-11278-0001-2021), e gerido pelo INESC P&D Brasil.

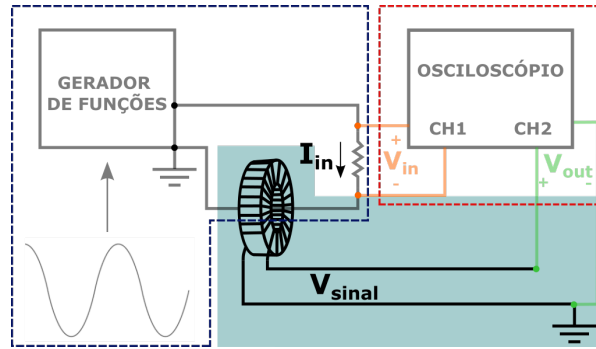


Figura 5 – Configuração experimental simplificada para avaliação da qualidade do sinal e levantamento da resposta em frequência dos indutores utilizados.

no desempenho dos núcleos, sendo o segundo capaz de fornecer ganhos ligeiramente maiores. Apesar disso, testes com o primeiro núcleo utilizando uma configuração experimental simplificada, mostrada na figura 5, permitiram melhor e mais fácil visualização e medição da informação em ambas as faixas de interesse. Com base nisso, foi selecionado o primeiro núcleo, em que $[r1, r2, h] = [23 \text{ mm}, 41 \text{ mm}, 35 \text{ mm}]$, para o desenvolvimento do sensor.

Ainda utilizando a configuração da figura 5, com a escolha do melhor núcleo, também foi investigada a resposta em frequência para enrolamentos de $N = 50, 100$ e 1000 voltas, além de um núcleo em configuração bipartida com enrolamento de $N = 88$ voltas. Os diagramas para a resposta em ganho levantados experimentalmente podem ser vistos na figura 6. Uma corrente de 7 mA foi utilizada nessa etapa do estudo. O enrolamento de 50 voltas obteve um melhor equilíbrio entre ganho e sensibilidade a maiores frequências, além de ter fabricação mais simples e barata do que os demais.

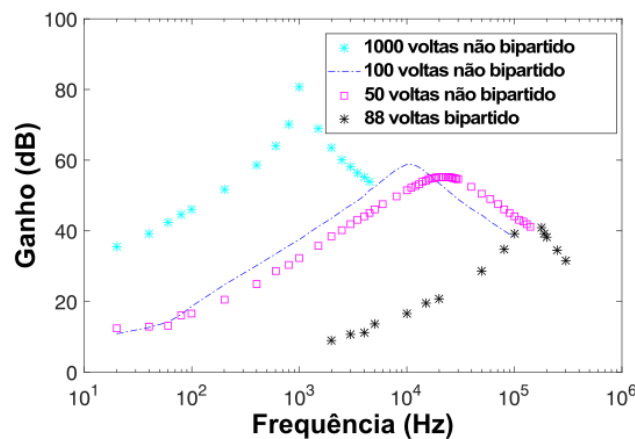


Figura 6 – Resposta em ganho para diferentes enrolamentos utilizando o primeiro núcleo ($[r1, r2, h] = [23 \text{ mm}, 41 \text{ mm}, 35 \text{ mm}]$). Adaptado de [1].

Superada a escolha da configuração mais adequada para o indutor, tendo em vista que a aplicação do sensor demanda a detecção de picos, ou seja, de uma componente de maior frequência, faz-se necessária a filtragem das componentes de menores frequências do sinal. Uma vez que o filtro é utilizado em um sistema de medição, que tem como finalidade

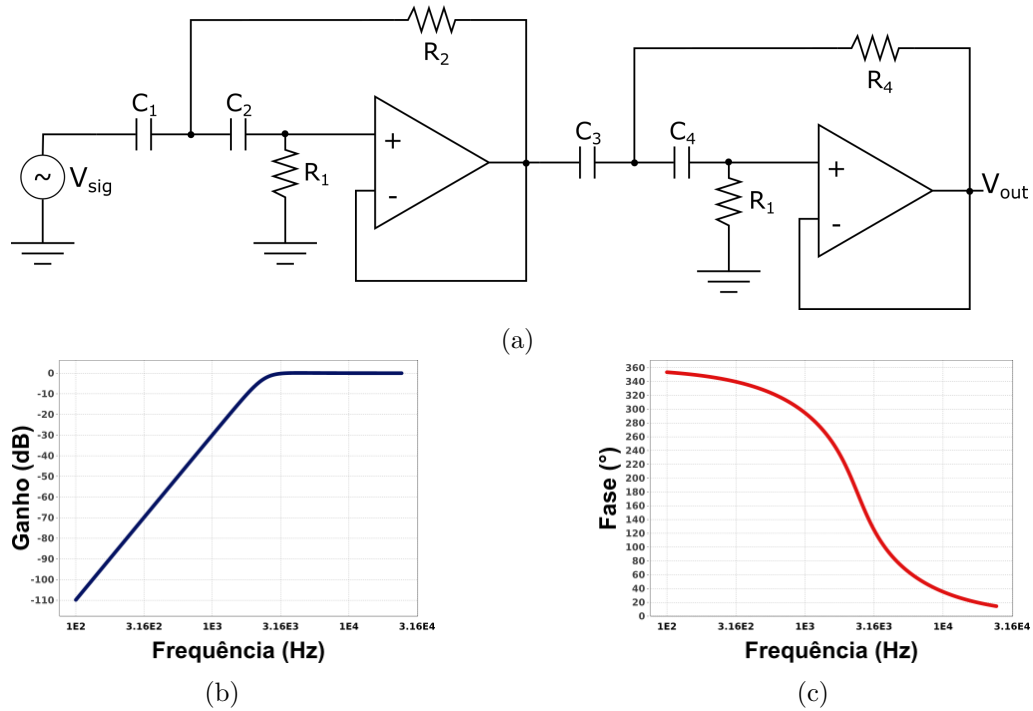


Figura 7 – Filtro passa-altas Butterworth de 4ª ordem com frequência de corte $f_C = 2,5$ kHz utilizado no projeto do sensor. (a) Diagrama elétrico, (b) resposta em ganho e (c) resposta em fase.

a recuperação do sinal de entrada a partir do processamento do sinal de saída, escolheu-se um filtro passa-altas do tipo Butterworth de 4ª ordem, cujos diagrama elétrico e de Bode podem ser vistos na figura 7.

Esse arranjo é capaz de manter o ganho na banda de passagem ($f_p > 2,5$ kHz) constante, facilitando a completude do sensoriamento. A banda atenuante foi projetada como $f_s < 1k$ Hz, de forma suficiente para atenuar a fundamental do sinal nominal (60 Hz) mais de 100 dB e amenizar fortemente até a 15ª harmônica na saída do filtro, como pode ser observado na figura 7(b). Por fim, a topologia Sallen-Key foi escolhida por facilitar possíveis ajustes de ganho no circuito sem a necessidade de mudança de sua resposta em frequência. O circuito foi projetado com uso da ferramenta de *design* de filtros WEBENCH (Texas Instruments Inc., EUA).

A partir do apresentado até então, foi definida a configuração experimental da figura 8. Tal arranjo foi utilizado em todas as demais etapas de avaliação do processo e do sistema de medição, apresentadas, respectivamente, nas seções 3.2, 3.3 e 3.4. A maquete na figura 8(a) visa emular o isolador, induzindo uma tensão no indutor que passa pelo filtro ativo e é, finalmente, medida com auxílio de osciloscópio na saída do sistema.

A confirmação do potencial de medição do sistema se configura por uma saída que mantém os picos (componente de alta frequência) enquanto amortiza consideravelmente a energia das harmônicas mais significativas (componente de baixa frequência) do sinal - o que pode ser visto no detalhe da figura 8(b).

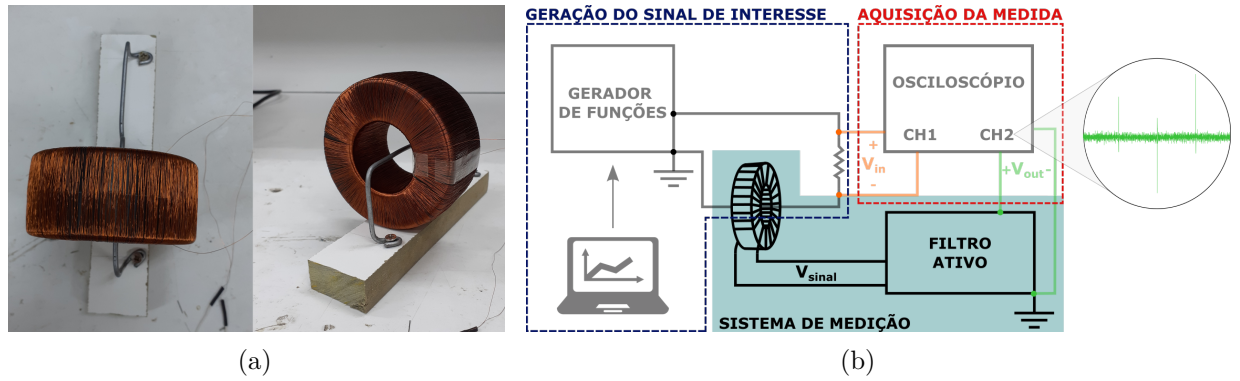


Figura 8 – Configuração experimental utilizada para a etapa de caracterização dos potenciais indutores do trabalho. (a) Diferentes vistas da maquete para simulação do fenômeno de indução e (b) diagrama de blocos da configuração experimental.

3.2 Procedimentos para Geração e Aquisição dos Dados

Tendo em vista a impossibilidade no início do trabalho de aquisição de sinais reais de alta tensão, foi necessária a geração de sinais de interesse artificiais para a realização da investigação proposta nesta dissertação. Seguindo a configuração experimental mostrada na figura 8, as curvas geradas por *script* de MATLAB (*versão R2023A*, MathWorks, EUA), do tipo mostrado na figura 9, foram carregadas individualmente em um gerador de funções (*DSO2D15* Qingdao Hantek Electronic Co., China). Cada curva possui apenas um período, disposto em 4096 amostras e numa amplitude que vai de -1 a 1 u.m.a., seguindo as especificações do gerador de funções.

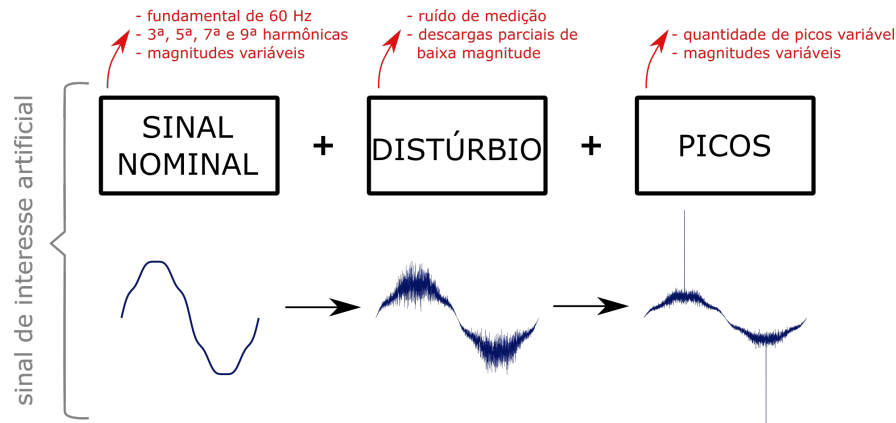


Figura 9 – Diagrama de construção do sinal de interesse artificial.

A curva gerada é composta por: uma componente de baixas frequências, chamada de sinal nominal, que contém a fundamental em 60 Hz numa magnitude variável a cada experimento e quatro harmônicas ímpares em magnitudes arbitrárias e fixas; uma componente de alta frequência, ou seja, os picos causados pelas descargas parciais de interesse; e uma componente de distúrbio [63] que, na verdade, representa descargas parciais de baixa magnitude e menor significância para a análise, além do ruído que pode ocorrer na linha de transmissão e no processo de medição.

Deve-se levar em conta que, ao longo do desenvolvimento do trabalho, notou-se que a literatura não é clara nem disponibiliza dados suficientes para a reprodução de sinais de interesse à aplicação. Consequentemente, o mesmo acontece para a componente de distúrbio, que não tem um modelo matemático delineado de seu comportamento. Apesar disso, das poucas evidências encontradas, infere-se que as ocorrências acontecem de maneira não determinística [46, 54], sendo necessária uma função de distribuição de probabilidade (FDP) para emulá-las no sinal de interesse artificial. Aplicou-se uma FDP normal, modelando os distúrbios ora como um “ruído” aditivo, ora como multiplicativo, em intensidades variáveis. Espera-se que, ao final da análise dos resultados, o modelo desse “ruído” não tenha importância no desempenho do sistema de medição. Isso porque uma das características adequadas ao processo de medição é a invariância ao tipo do distúrbio, como ilustrado na figura 1.

Para garantir o valor de corrente nominal e de picos condizente com a definição para cada um dos experimentos, o sinal advindo do gerador de funções deve ser conectado a um resistor e, então, à maquete da figura 8(a). Tal resistor é escolhido previamente por

$$R = \frac{V_g}{I_{nom} + I_{pico}}, \quad (3.1)$$

onde R é o resistor, $V_g = 3,5$ V é a tensão máxima fornecida pelo gerador de funções, I_{nom} é a magnitude desejada da corrente nominal e I_{pico} é a magnitude desejada do pico de corrente. A tensão aplicada no condutor da maquete causa um efeito no indutor, como posto pela Lei de Faraday,

$$\varepsilon = N \frac{d\Phi}{dt}, \quad (3.2)$$

onde ε é a força eletromotriz (f.e.m.) ou tensão induzida na bobina, dada em volts (V), e Φ é o fluxo magnético, dado em webers (Wb) [64, 65]. A tensão induzida $\varepsilon = V_{sig}$ é, então, tomada nos terminais do enrolamento, sendo depois passada pelo filtro ativo implementado, cuja saída fica disponível para aquisição.

Como mencionado no capítulo 2, é prática comum na literatura relacionada que, em ambiente de laboratório, sinais de corrente de fuga, independentemente dos métodos de sensoramento e de processamento, sejam adquiridos através do osciloscópio utilizado para visualizá-los ou de *data loggers*. Dessa forma, neste trabalho, a aquisição tanto do sinal de entrada V_{in} , quanto da saída do sistema de medição V_{out} , também foi feita de tal maneira.

Entretanto, apesar de esse ser o procedimento padrão, há escassez de investigações a respeito de parâmetros como resolução e taxa de aquisição dos equipamentos e sua adequação em relação ao sinal medido, principalmente ao se tratar de um fenômeno que ocorre em regime transitório do sinal de corrente de fuga. Tal abordagem é importante do ponto de vista da adequação dos equipamentos de medição à aplicação, principalmente

quando se deseja manter a informação dos picos, já que a resolução insuficiente pode causar medidas erradas, como visto no exemplo da figura 10. Sendo assim, no desenvolvimento deste trabalho, julgou-se necessário uma reflexão acerca da escolha do equipamento e de suas configurações para aquisição da medição advinda do sistema.

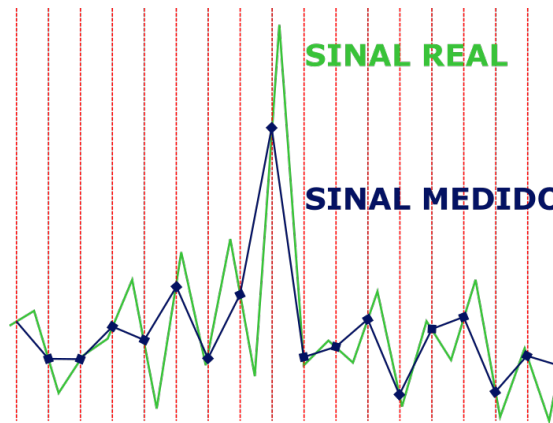


Figura 10 – Exemplo do impacto de uma taxa de amostragem inadequada à medida de picos no sinal.

Como alerta ao leitor, de maneira geral, ao longo da avaliação apresentada neste e no capítulo 4, para fins de melhor visualização dos fenômenos descritos, serão mostrados sinais cuja magnitude dos picos é significativamente maior em relação à magnitude do sinal nominal. Todavia, foram avaliadas diferentes combinações de magnitude de pico e de nominal, inclusive casos em que os picos não foram mensuráveis. De maneira mais explícita, no conjunto total dos experimentos, aplicou-se razões do tipo

$$0,01 \leq \frac{I_{nominal}}{I_{pico}} \leq 100. \quad (3.3)$$

O Laboratório de Biomédica, Instrumentação e Microeletrônica (LABIM) da UFS, onde foi desenvolvido este trabalho, conta com dois modelos de osciloscópio, *TBS 1000C series* (Tektronix Inc., EUA)² e *DSO2D15* (Qingdao Hantek Electronic Co., China). Para essa primeira avaliação, foram gerados sinais de interesse sem distúrbio artificial, com a componente nominal de magnitude de 0,5 mA e picos com magnitudes de 0,5 mA e 1 mA, que podem ser vistos conforme gerados pelo *script* de MATLAB na figura 11.

Tais valores foram escolhidos por representarem o limite inferior tipicamente encontrado para sinais de corrente de fuga, mas com picos numa proporção suficiente para garantir a visualização através do osciloscópio. Foram feitas três aquisições de janelas com pelo menos um e no máximo oito períodos para cada sinal de interesse em cada um dos osciloscópios, de forma a não comprometer a integridade da visualização da curva

² Equipamento adquirido com recursos do projeto de pesquisa e desenvolvimento "GImpSI – Gestão dos Impactos da Salinidade em Isolamentos", financiado pela Eneva no âmbito do Programa de P&D ANEEL (Código ANEEL: PD-11278-0001-2021), e gerido pelo INESC P&D Brasil.

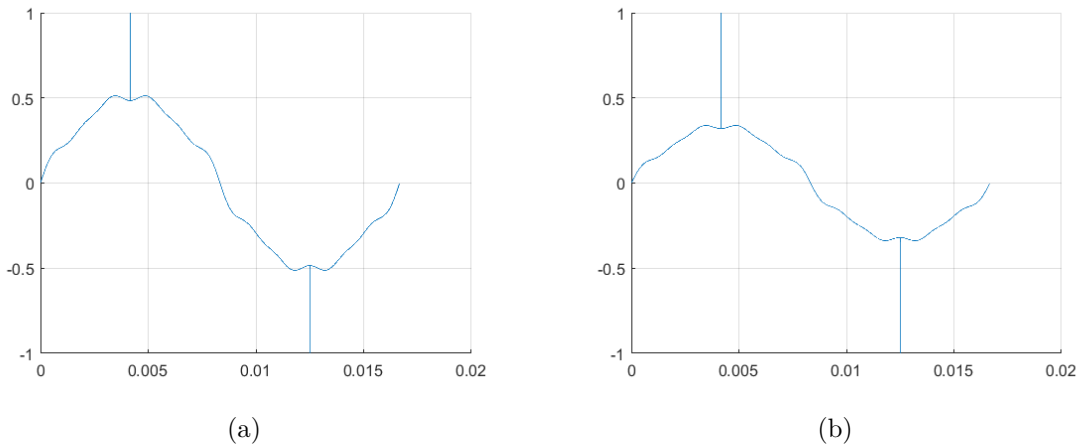


Figura 11 – Sinais com 0,5 mA de magnitude do sinal nominal e (a) 0,5 mA e (b) 1 mA de magnitude do pico gerados pelo *script* em MATLAB.

gerada. As métricas utilizadas na decisão do melhor procedimento a ser seguido foram tanto qualitativas (integridade dos picos e qualidade da visualização) quanto quantitativas (quantidade de amostras ou resolução do sinal adquirido).

Na figura 12, podem ser observados exemplos de capturas do sinal V_{in} fornecido pelo gerador de funções e do sinal V_{sig} tomado na saída do indutor, ambos adquiridos por cada um dos osciloscópios.

É possível observar desde já indícios da inadequação do uso de osciloscópio como equipamento de aquisição de dados para a aplicação. Na tentativa de minimizar esse efeito, deve-se, pelo menos, escolher um modelo que forneça uma saída com um maior número de amostras. Para o osciloscópio da fabricante Tektronix, a saída possui 1000 amostras, contra 3968 do osciloscópio da fabricante Hantek. Dessa forma, optou-se por utilizar o *DSO2D15* para dar continuidade ao desenvolvimento do trabalho.

Entretanto, vê-se que, apesar do maior número de aquisições na janela de observação, nas figuras 12(a) e 12(c), há uma discrepância entre a magnitude dos picos medidos na saída. Um efeito parecido pode ser observado também com a avaliação do sistema de medição por completo. Nas figuras 13(a) e 13(b), tem-se a captura de V_{in} e V_{out} para sinais de 0,5 mA de nominal e, respectivamente, 0,05 mA e 50 mA de pico. Para a primeira configuração, é possível observar que a entrada carregada chega mais perto de fornecer a tensão máxima do gerador. Já para a segunda, na janela de observação capturada, somente um dos picos está próximo do nível de 3,5 V (em destaque pela linha tracejada).

Muito possivelmente, esse fenômeno se deve à inadequação da taxa de amostragem frente à componente de maior frequência do sinal, fazendo com que ocorra o ilustrado na figura 10. Mesmo com um equipamento de aquisição com uma taxa de amostragem mais adequada, faz-se a ressalva de que, neste trabalho, foi feito uso de sinais periódicos para extrapolar as características do processo e do sistema de medição, o que não é

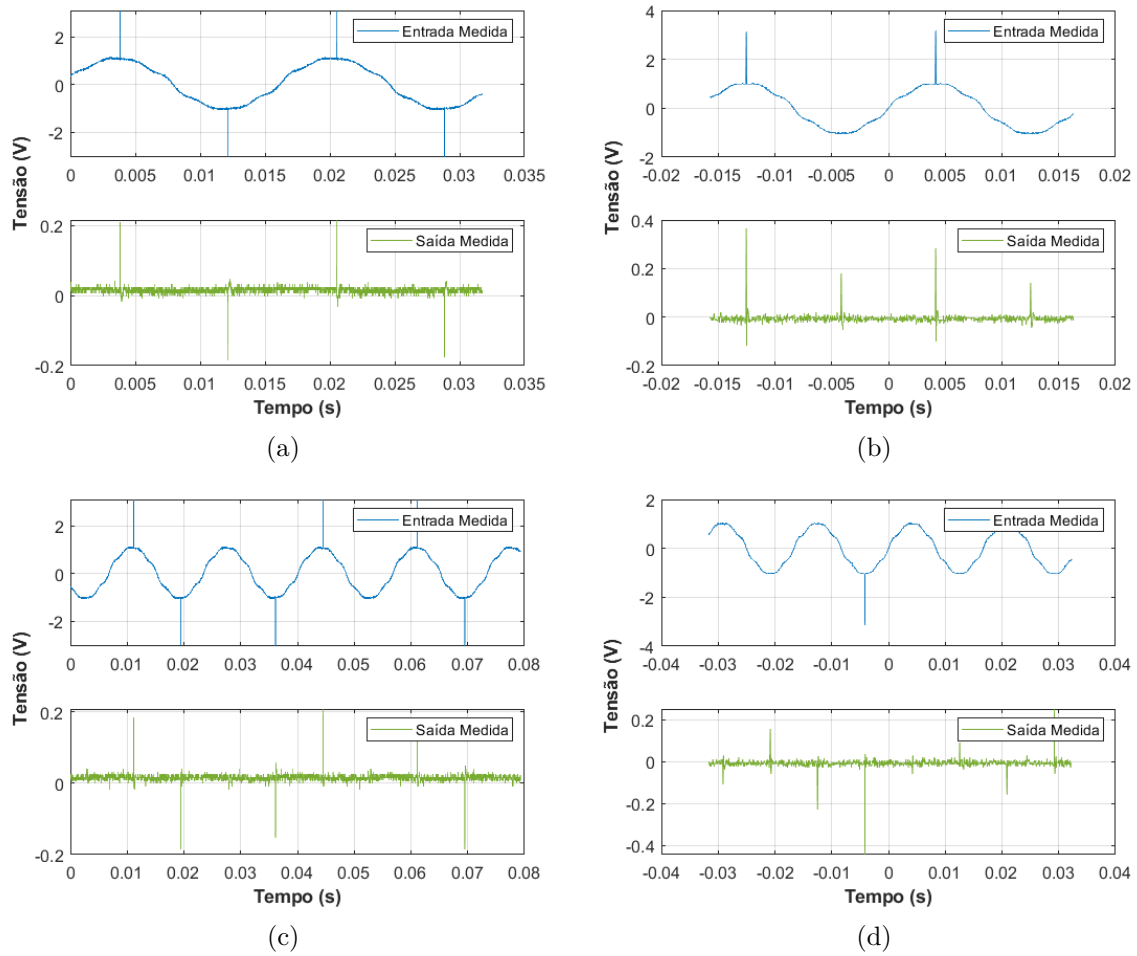


Figura 12 – Sinal de 0,5 mA de nominal e 1 mA de pico fornecido pelo gerador de funções (entrada medida) e tomado no indutor (saída medida) para os osciloscópios disponíveis. (a) Hantek para 1 período, (b) Tektronix para 1 período, (c) Hantek para 4 períodos e (d) Tektronix para 3 períodos.

verdade quando se trata de sinais de interesse com características mais próximas do real, ou seja, sinais verdadeiramente esparsos. Apesar de muito fundamental, tal verificação não é abordada na literatura relacionada, sendo sinais adquiridos via osciloscópio tidos como confiáveis em todos os trabalhos observados ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Os efeitos de tal constatação devem ser levados em conta na análise dos resultados dos experimentos de caracterização e uniformidade do sensoriamento.

3.3 Caracterização do Sistema de Medição

O experimento para caracterização do sistema de medição teve como objetivo principal o delineamento das especificações técnicas do sistema. Ainda, realizou-se o levantamento experimental da curva que relaciona o sinal de corrente I_{in} na maquete que emula o isolador com o sinal de tensão V_{out} medido na saída do filtro ativo, vide figura 8.

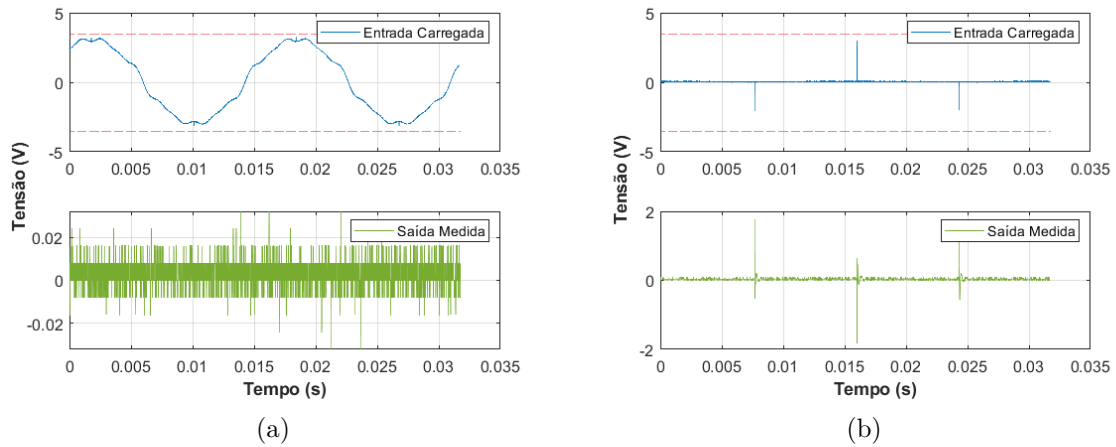


Figura 13 – Sinais com 0,5 mA de magnitude do sinal nominal e (a) 0,05 mA e (b) 50 mA de magnitude do pico fornecidos pelo gerador de funções (entrada medida) e tomados no indutor (saída medida) para o osciloscópio Hantek com 1 período na janela de observação. As linhas tracejadas representam o nível de tensão de 3,5 V.

Para alcançar esses objetivos, foram realizados quatro conjuntos de medições. Cada conjunto possui as mesmas 40 IDs, ou seja, combinações de diferentes valores de magnitude de nominal e de pico. A diferença entre cada conjunto se deu pela existência e magnitude da componente de distúrbio com relação à magnitude da componente fundamental do sinal nominal, de acordo com a tabela 2.

Tabela 2 – Especificação de cada conjunto de experimentos para a caracterização

Dados	Magnitude do Distúrbio
Conjunto 1	0%
Conjunto 2	10%
Conjunto 3	20%
Conjunto 4	30%

Neste experimento, os distúrbios na corrente de fuga forma modelados como um “ruído” aditivo. Essa representação considera que há perturbação considerável em qualquer instante de ocorrência do sinal de interesse, o que cria um desafio significativo para o sistema de medição. Uma vez que o sinal apresenta níveis de distúrbio mais elevados em comparação com o que normalmente é encontrado em sinais reais, é possível avaliar a qualidade da medição no pior cenário possível, dentro da configuração experimental adotada.

Os valores ideais de magnitude da componente fundamental do sinal nominal foram escolhidos entre $I_{nominal} = 0,5; 1; 2$ e 5 mA e os de magnitude dos picos entre $I_{pico} = 0,05; 0,1; 0,5; 1; 3; 5; 10; 20; 30$ e 50 mA. A reprodução experimental dessas correntes foi feita a partir da escolha do resistor R , utilizando (3.1). Um exemplo das dez primeiras combinações pode ser visto na tabela 3. Como é de se esperar, é possível observar que há

um erro entre os valores de R calculados e medidos. Esse efeito foi amplificado pela não existência de resistores da série E24 para todos os valores teóricos estabelecidos. O maior erro entre resistências obtido entre todas as IDs foi ligeiramente menor que 10%.

Tabela 3 – Exemplo de combinações utilizadas para gerar as IDs para o experimento de caracterização

ID	$I_{nominal}$ (mA _{pk})	I_{pico} (mA _{pk})	V_{in} (V _{pk})	$R_{calculado}$ (Ω)	R_{real} (Ω)	Erro em R (%)
1	0,5	0,05	3,5	6364	6,66k	4,66
2	0,5	0,1	3,5	5833	5,881k	0,82
3	0,5	0,5	3,5	3500	3,416k	2,40
4	0,5	1	3,5	2333	2,205k	5,50
5	0,5	3	3,5	1000	0,982k	1,80
6	0,5	5	3,5	636	614,2	3,43
7	0,5	10	3,5	333	324,9	2,53
8	0,5	20	3,5	171	178,5	4,55
9	0,5	30	3,5	115	117,2	2,13
10	0,5	50	3,5	69	68,1	1,74

Uma vez que os níveis de corrente de fuga em isoladores não possuem padrões definidos nem valores fixos [5], vê-se uma grande variedade na literatura de possíveis faixas [18, 24, 29, 30, 43, 45, 48] a depender do tipo do isolador, das condições ambientais e da localização da linha de transmissão ou subestação. Entretanto, parece haver maior consenso na literatura em relação aos valores de magnitude da componente fundamental do sinal nominal. Assim, os valores utilizados para a avaliação do sistema de medição foram selecionados com base nos valores tipicamente encontrados para corrente de fuga em baixa frequência, enquanto que se observou valores de magnitude de pico em condições úmidas de até 50 mA, ambos dentro de faixas de operação adequadas.

Para os experimentos de caracterização, os picos foram posicionados de forma a coincidir com os picos dos semiciclos positivo e negativo do sinal nominal. Exemplos de sinais gerados pelo *script* do MATLAB e reproduzidos pelo gerador de função podem ser vistos nas figuras 14 a 17, com os mesmos valores de $I_{nominal}$ e I_{pico} para os diferentes conjuntos da caracterização.

Por fim, foi obedecida a configuração experimental da figura 8, com os equipamentos de geração e aquisição dos sinais elencados na seção 3.2. Cada ID teve a janela de observação com apenas um período do sinal adquirida dez vezes, totalizando 1600 aquisições para todos os conjuntos. A escolha do número de aquisições foi baseada na tentativa de trazer maior relevância estatística para os dados coletados. Os resultados desse experimento são abordados no capítulo 4.

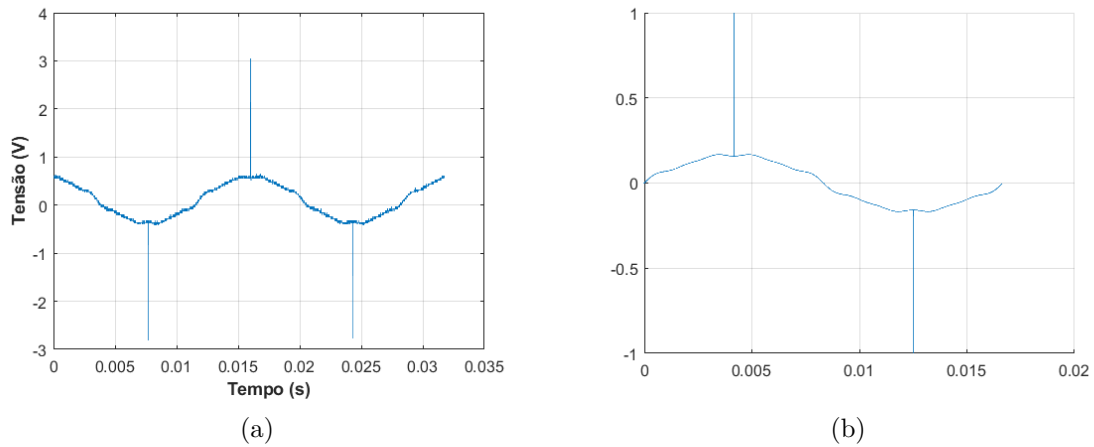


Figura 14 – Sinais de entrada de 2 mA de magnitude do sinal nominal e 10 mA de magnitude de pico no Conjunto 1 do experimento de caracterização (ID 27). (a) Medido no osciloscópio e (b) gerado por *script* do MATLAB.

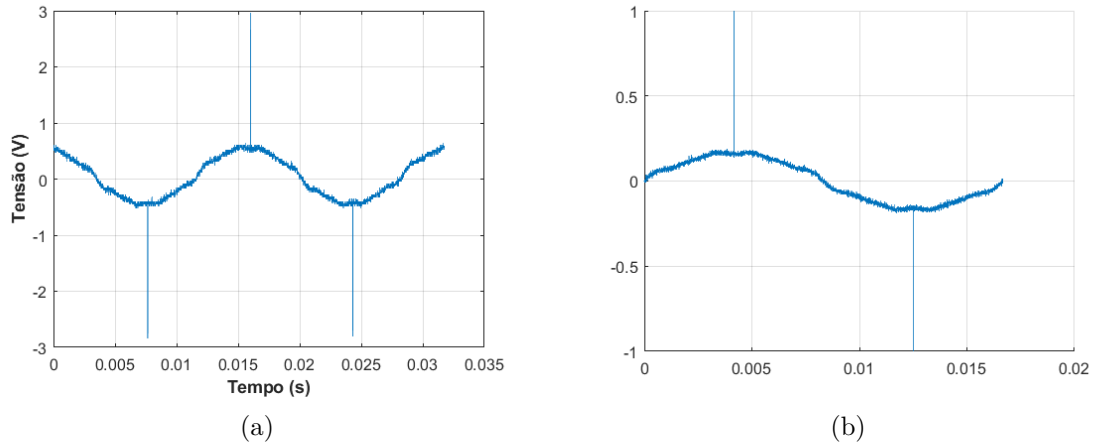


Figura 15 – Sinais de entrada de 2 mA de magnitude do sinal nominal e 10 mA de magnitude de pico no Conjunto 2 do experimento de caracterização (ID 67). (a) Medido no osciloscópio e (b) gerado por *script* do MATLAB.

3.4 Uniformidade do Sensoriamento

O experimento para avaliar a uniformidade do sensoriamento teve como objetivo principal investigar o desempenho do sistema de medição com relação a características importantes para seu funcionamento adequado, como invariância à magnitude da nominal, ao tipo de distúrbio, e ao instante de ocorrência dos picos.

De maneira similar ao experimento de caracterização, o protocolo experimental dessa etapa também foi realizado por conjuntos de apenas um sinal cada, mas com cem diferentes aquisições. A diferença entre cada conjunto se dá no tipo e na magnitude do distúrbio, que foram variadas conforme disposto na tabela 4.

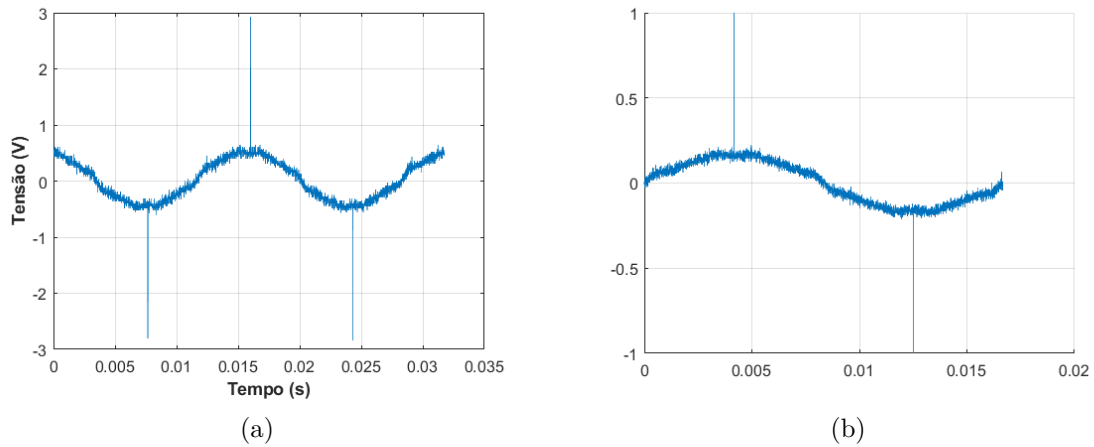


Figura 16 – Sinais de entrada de 2 mA de magnitude do sinal nominal e 10 mA de magnitude de pico no Conjunto 3 do experimento de caracterização (ID 107). (a) Medido no osciloscópio e (b) gerado por *script* do MATLAB.

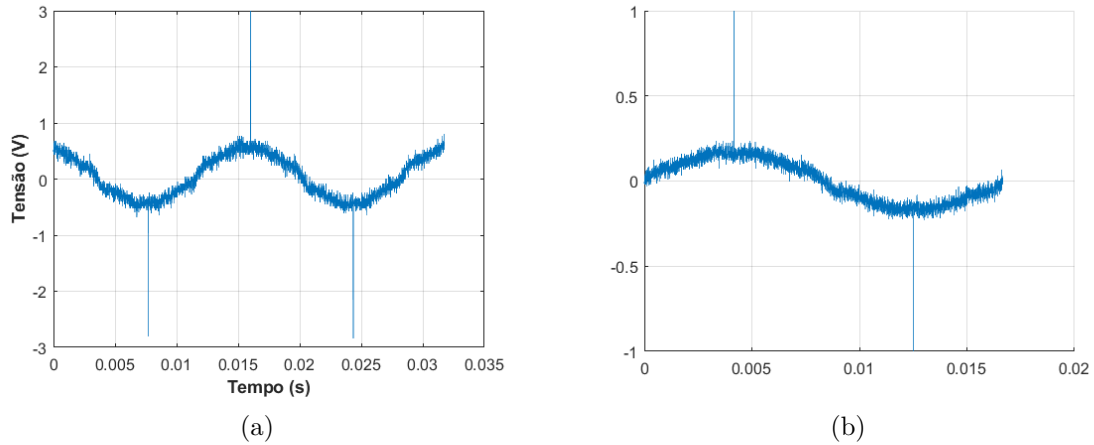


Figura 17 – Sinais de entrada de 2 mA de magnitude do sinal nominal e 10 mA de magnitude de pico no Conjunto 4 do experimento de caracterização (ID 147). (a) Medido no osciloscópio e (b) gerado por *script* do MATLAB.

Tabela 4 – Especificação de cada conjunto de experimentos acerca da uniformidade do sensoriamento

Dados	Modelo do Distúrbio	Magnitude do Distúrbio
Conjunto 1	-	0%
Conjunto 2	Aditivo	10%
Conjunto 3	Aditivo	20%
Conjunto 4	Aditivo	30%
Conjunto 5	Multiplicativo	10%
Conjunto 6	Multiplicativo	20%
Conjunto 7	Multiplicativo	30%

As magnitudes ideais de $I_{nominal}$ e I_{pico} foram ambas de 2,75 mA. Esse valor e a proporção obtida entre sinal nominal e pico foram escolhidas por serem consideradas suficientes para identificação clara dos picos em todos os conjuntos do experimento. É assumido que, uma vez que os picos sejam identificados em todos os conjuntos, mesmo

com valores tão pequenos de magnitude, eles também serão identificados para valores mais expressivos. Mais uma vez, a reprodução dos valores das correntes foi feita a partir da escolha de um único resistor R , utilizando (3.1).

Diferentemente do que ocorre na caracterização, aqui, o sinal gerado teve picos localizados a cada $1/4$ de semiciclo positivo e negativo da nominal. A única exceção é para o primeiro pico, que precisou ser deslocado de dez amostras para se adequar ao processo de carregamento da onda arbitrária no gerador de funções. Essa característica é fundamental para a investigação da uniformidade em relação à métrica de invariância ao instante de ocorrência dos picos. Exemplos do sinal gerado pelo *script* do MATLAB e reproduzidos pelo gerador de função para os conjuntos 1, 3 e 7 podem ser vistos nas figuras 18 a 20. Nesse experimento, fica ainda mais evidente o efeito de inadequação da taxa de amostragem do osciloscópio para a aplicação com a perda dos picos nos sinais de entrada medidos.

Mais uma vez, foi obedecida a configuração experimental da figura 8, com os equipamentos de geração e aquisição dos sinais elencados na seção 3.2. Cada conjunto teve a janela de observação com um período do sinal adquirida 100 vezes, totalizando 700 aquisições para todos os conjuntos. A escolha do número de aquisições foi baseada na tentativa de trazer maior relevância estatística para os dados coletados. Os resultados desse experimento são abordados no capítulo 4.

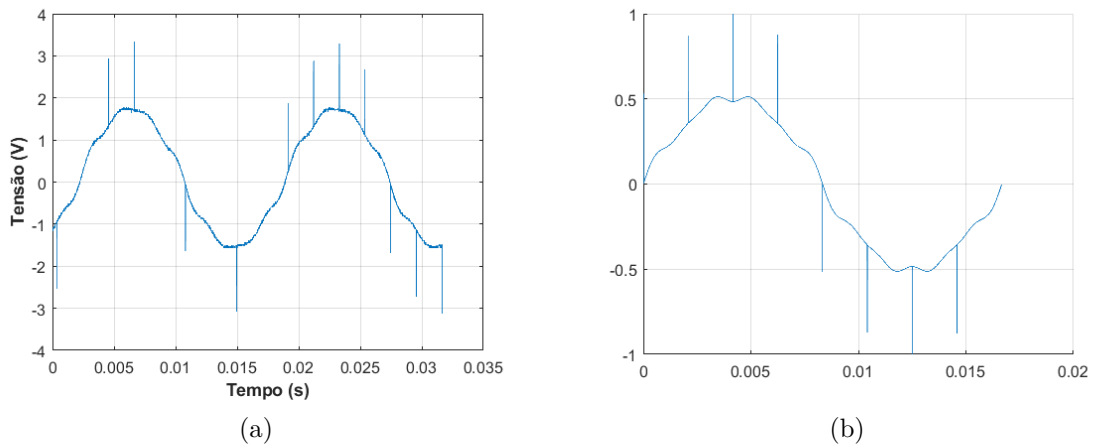


Figura 18 – Sinais de entrada de 2,75 mA de magnitude do sinal nominal e de magnitude de pico no Conjunto 1 do experimento de uniformidade. (a) Medido no osciloscópio e (b) gerado por *script* do MATLAB.

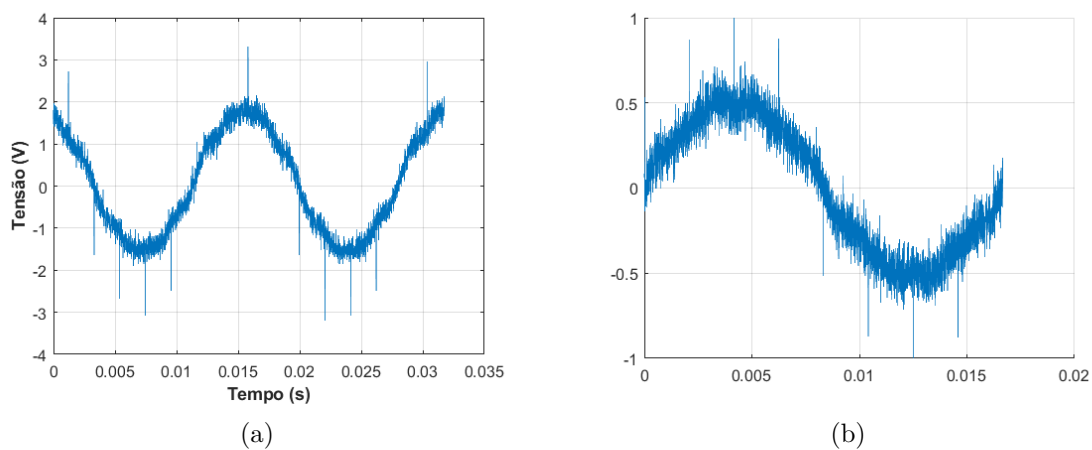


Figura 19 – Sinais de entrada de 2,75 mA de magnitude do sinal nominal e de magnitude de pico no Conjunto 3 do experimento de uniformidade. (a) Medido no osciloscópio e (b) gerado por *script* do MATLAB.

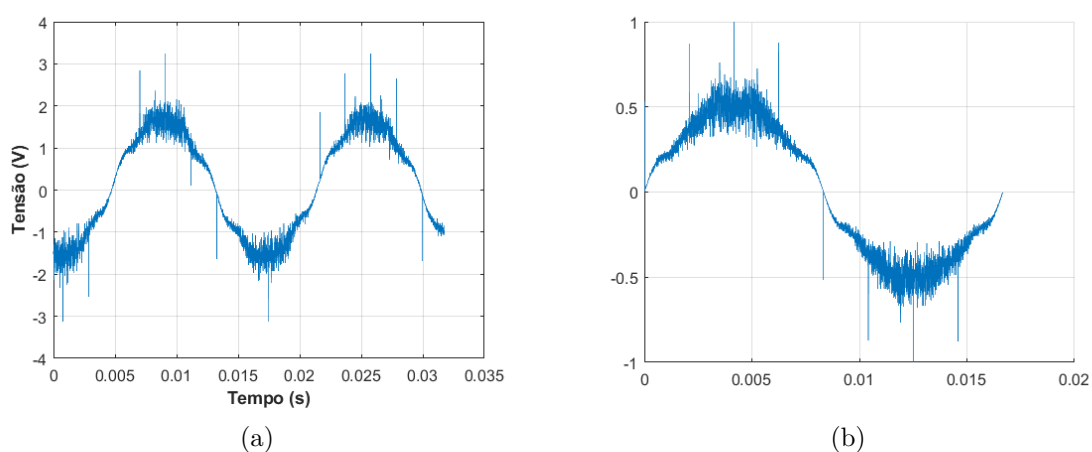


Figura 20 – Sinais de entrada de 2,75 mA de magnitude do sinal nominal e de magnitude de pico no Conjunto 7 do experimento de uniformidade. (a) Medido no osciloscópio e (b) gerado por *script* do MATLAB.

4 Resultados e Discussão

Apesar de os experimentos de caracterização do sistema de medição e de avaliação da uniformidade do sensoramento terem seus desenvolvimentos explanados separadamente no capítulo 3, suas métricas são utilizadas de maneira conjunta e complementar na análise dos resultados do trabalho. Assim, utilizando ambas as abordagens, tendo em vista os objetivos e o escopo deste mestrado, conforme ilustrado na figura 1, buscou-se responder às seguintes questões ligadas às usabilidade e adequação do sistema de medição à aplicação:

1. Quais as característica e equação da curva que relaciona entrada e saída do sistema de medição?
2. Quais os limites de operação do sistema de medição?
3. O sistema de medição é invariante à magnitude e ao tipo do distúrbio?
4. O sistema de medição é invariante à magnitude do sinal nominal?
5. O sistema de medição é invariante ao instante de ocorrência dos picos?

4.1 Característica e Equação da Curva de Medição

A resposta para a primeira questão é diretamente associada ao resultado visto na figura 21, em que se mostra o gráfico que relaciona a amplitude dos picos de corrente na entrada do sistema com a amplitude dos picos de tensão na sua saída - ou seja, a curva que representa o sistema de medição.

Observa-se uma característica linear, regida pela equação da reta,

$$Vp_{out} = \alpha \cdot Ip_{in} + \beta, \quad (4.1)$$

onde Vp_{out} é a amplitude dos picos de tensão na saída, Ip_{in} é a amplitude dos picos de corrente na entrada, $\alpha = 60,9$ e $\beta = 0,02$. A curva foi modelada utilizando 1100 pontos advindos do valor máximo dos picos de cada uma das aquisições do experimento de caracterização por meio do método de mínimos quadrados (MMQ) [66]. Ou seja, do total de 1600 aquisições realizadas para o experimento de caracterização, 500 pontos foram descartados no processo de modelagem do sistema de medição. Esses dados rejeitados se referem às aquisições de IDs cujos picos não foram identificados na saída, ou seja, a magnitude dos picos em V_{out} é menor que a do distúrbio.

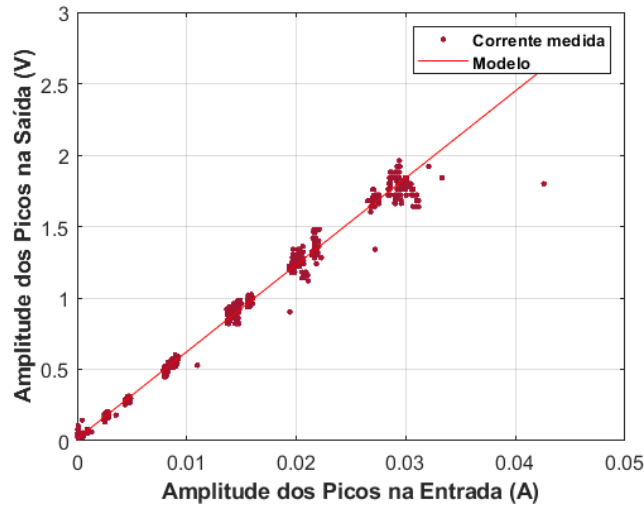


Figura 21 – Relação entre os picos de corrente na entrada e os picos de tensão na saída do sistema de medição.

A partir dos dados utilizados, foi ainda calculado o coeficiente de Pearson $r = 0,9965$ - um valor que indica a correlação entre as medidas tomadas na saída do sistema e o resultado da regressão linear obtida pelo MMQ. Dessa forma, o parâmetro foi utilizado como uma estimativa da linearidade da medição, sendo obtido por

$$r = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}}, \quad (4.2)$$

onde x_i representa o i -ésimo valor medido, y_i é o i -ésimo valor obtido pela regressão e n é o número de amostras. Quanto mais próximo de 1, maior a correlação linear [67].

4.2 Limites de Operação do Sistema de Medição

Com os dados utilizados do Conjunto 1, foi possível definir que, para que seja feita a identificação de um pico, sua magnitude precisa ser de, pelo menos, 20% da magnitude do sinal nominal. Já com os dados dos outros conjuntos, observou-se que o pico precisa representar, pelo menos, três vezes a magnitude do desvio padrão correspondente ao distúrbio aplicado em cada ID. Já em termos absolutos, analisando as informações adquiridas para todos os conjuntos, inclusive aquele em que o distúrbio é de 0% da magnitude do sinal nominal, independentemente da magnitude do sinal nominal, o sistema não foi capaz de medir picos menores que $500 \mu A$.

É importante ressaltar a diferença de 1000 vezes entre o valor mínimo e o máximo de I_{pico} avaliados, com proporções de acordo com (3.3). Com isso, há a expectativa de que o sistema de medição seja capaz de identificar picos ainda maiores. Apesar disso, deve ser considerado que as especificações discutidas ainda não podem ser tidas como conclusivas. Tanto elas dependem da magnitude do pico frente à magnitude do sinal nominal, quanto

se faz necessário um maior número e refinamento das faixas de valores para caracterização completa do sistema. Além disso, sabe-se também que há a problemática da inadequação da taxa de amostragem para a aquisição dos dados.

4.3 Invariância à Magnitude do Distúrbio

Os dados obtidos no experimento de caracterização também foram organizados e modelados de forma a explicitar o comportamento do sistema de acordo com cada conjunto do experimento de caracterização e também de acordo com as diferentes magnitudes ideais de corrente do sinal nominal, como pode ser visto na figura 22.

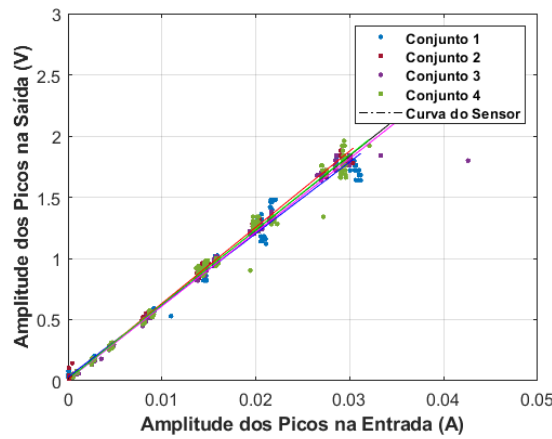


Figura 22 – Relação entre os picos de corrente na entrada e os picos de tensão na saída do sistema de medição de acordo com a magnitude do distúrbio

Qualitativamente, ao observar a tendência de dispersão dos pontos de cada conjunto na figura 22, pode-se inferir a respeito da invariância à magnitude do distúrbio. Quantitativamente, tal inferência é corroborada pela informação na tabela 5, onde são observados os coeficientes α e β para esses dados. Nota-se o pequeno valor do desvio (σ) dos coeficientes entre todas as retas modeladas, sendo o maior erro para o coeficiente angular em relação ao modelo da curva do sistema de medição menor que 4%.

Tabela 5 – Coeficientes das retas modeladas para cada magnitude de distúrbio (conjunto) dos experimentos de caracterização

Dados	α	β
Conjunto 1	58,6	0,03
Conjunto 2	62,3	0,01
Conjunto 3	60,3	0,01
Conjunto 4	61,1	0,01
Modelo do Sistema	60,9	0,02
σ	1,4	0,01

4.4 Invariância à Magnitude da Nominal

Uma análise similar pode ser empregada para os dados da figura 23, agrupados de acordo com as magnitudes ideais de corrente do sinal nominal.

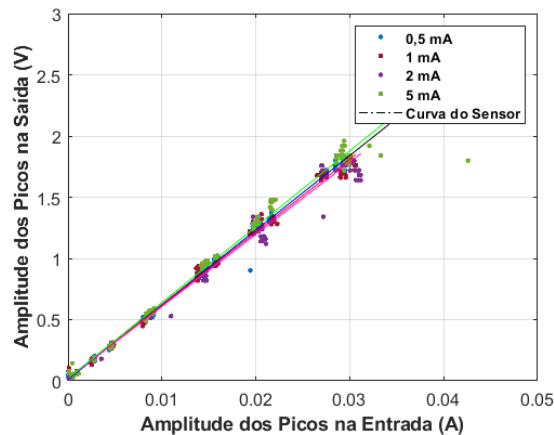


Figura 23 – Relação entre os picos de corrente na entrada e os picos de tensão na saída do sistema de medição de acordo com a magnitude da componente fundamental do sinal nominal.

Uma vez que o sistema de medição exerce forte atenuação até a 15^a harmônica do sinal nominal, a influência das mesmas deve ser irrisória na saída medida. Esse fenômeno também pode ser atestado qualitativamente, ao observar a dispersão mínima das curvas modeladas e, quantitativamente, a partir das informações da tabela 6. O desvio entre os coeficientes foi ainda menor do que o encontrado para os dados agrupados por conjunto, apresentando um erro máximo do coeficiente angular em relação ao modelo da curva do sistema de medição menor que 2%.

Tabela 6 – Coeficientes das retas modeladas para cada magnitude ideal de corrente do sinal nominal dos experimentos de caracterização

Dados	α	β
0,5 mA	61,1	0,02
1 mA	59,7	0,02
2 mA	58,9	0,02
5 mA	61,9	0,02
Modelo do Sistema	60,9	0,02
σ	1,2	0

4.5 Invariância ao Tipo de Distúrbio e Instante de Ocorrência dos Picos

Para responder aos questionamentos restantes, foi necessário utilizar os dados advindos do experimento de uniformidade do sensoriamento, que são, inicialmente, da forma mostrada na figura 24.

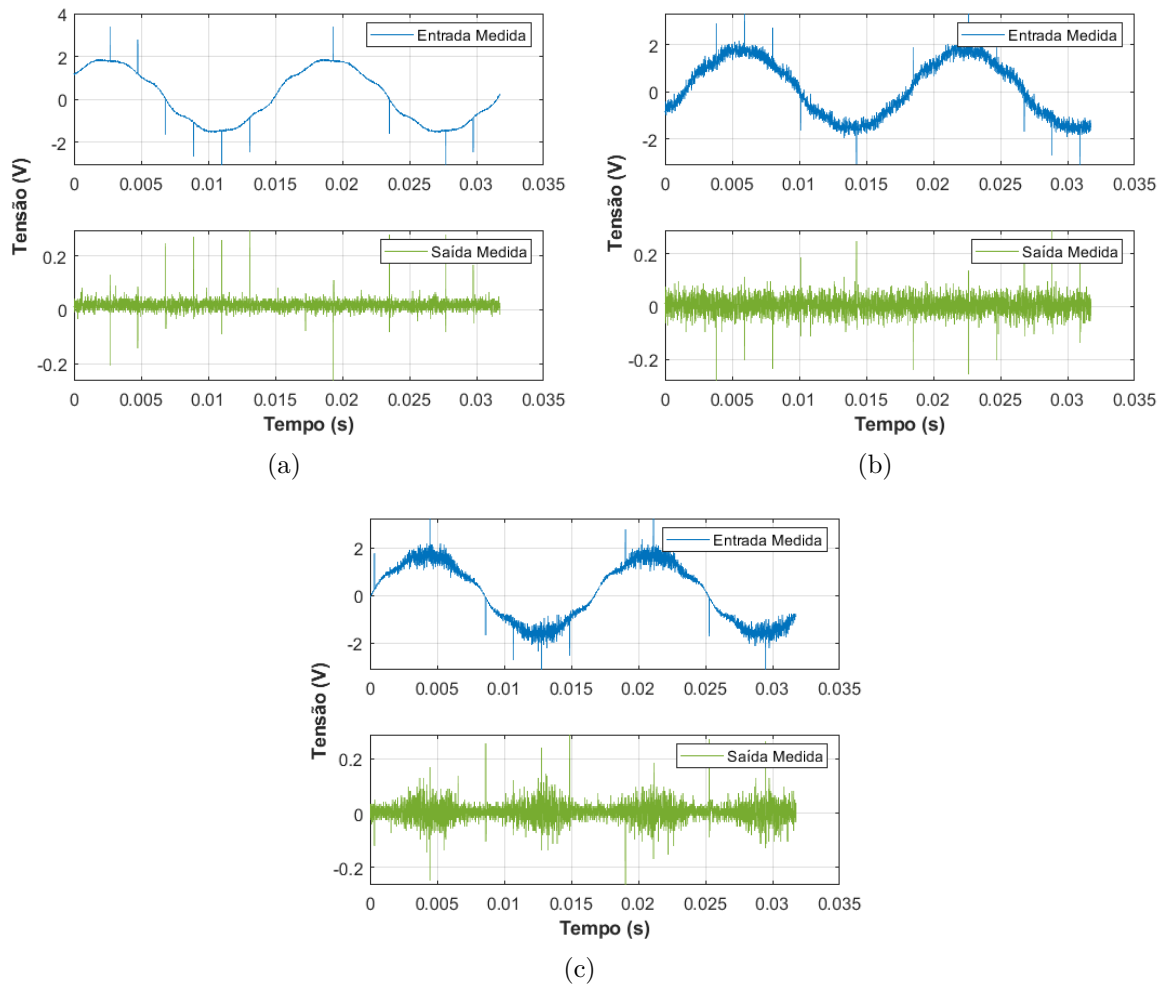


Figura 24 – Exemplos de aquisições do experimento de uniformidade do sensoriamento para (a) Conjunto 1, (b) Conjunto 3 e (c) Conjunto 7.

Com a observação exaustiva das 700 aquisições, escolheu-se como limiar de identificação dos picos os valores de 1,15 V para a entrada e 0,15 V para a saída. Ainda, cada pico possível dentro de um período do sinal de entrada recebeu uma etiqueta de “a” a “h”, representando os oito possíveis picos, que eram correspondidos pelos picos obtidos na saída. Por fim, foi estabelecida uma tolerância para o instante de ocorrência em que os picos poderiam ser encontrados em cada um dos sinais com base nas posições do sinal gerado no *script* de MATLAB, uma vez que se sabe de possíveis erros na geração e aquisição dos dados. Ao fim desse procedimento, a observação dos sinais assume a forma mostrada na figura 25. Os círculos preenchidos por asterisco, em vermelho, são apenas indicadores do instante de ocorrência em que o pico foi identificado.

Na figura 25(c), vê-se uma etiqueta “?” em um dos picos da saída medida. Isso significa que, apesar de dentro do intervalo de tolerância e de obedecer o limiar de identificação, o pico não tem correspondente no sinal de entrada (ou vice-versa). Assim, para que se pudesse inferir a respeito da invariância ao tipo de distúrbio e ao instante de ocorrência dos picos, foram considerados apenas os picos que, de fato, tinham correspondência tanto na

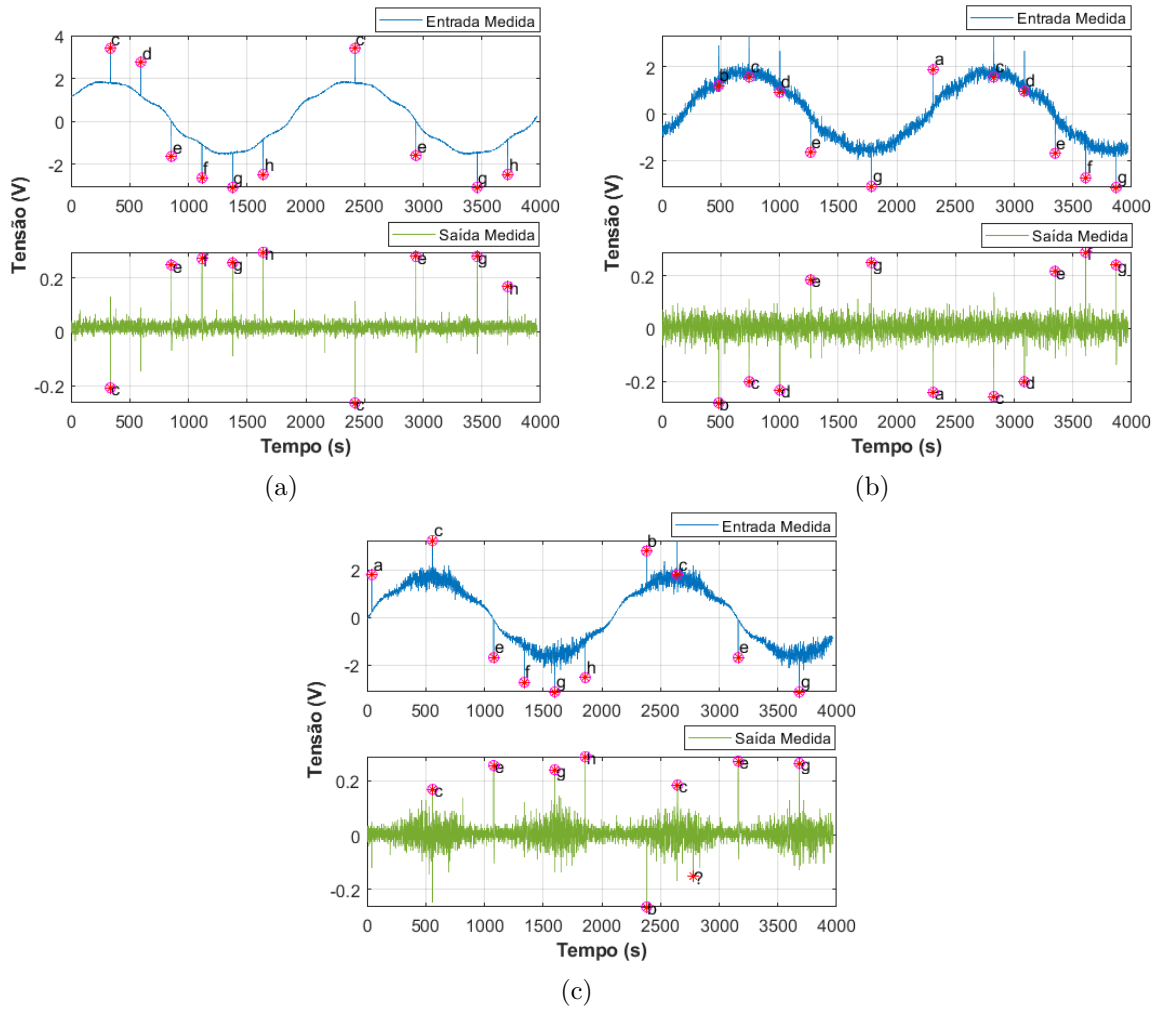


Figura 25 – Exemplos de aquisições já etiquetadas do experimento de uniformidade do sensoriamento para (a) Conjunto 1, (b) Conjunto 3 e (c) Conjunto 7.

entrada quanto na saída medidas. Tal decisão foi tomada na tentativa de burlar os efeitos da inadequação da taxa de amostragem do equipamento de aquisição, mesmo sabendo que há perda de informação ao se prosseguir com essa abordagem. É importante lembrar que as ondas geradas pelo *script* e carregadas no gerador de funções possuem quatro vezes mais picos em comparação com os sinais do experimento de caracterização.

Os dados selecionados foram empregados na geração dos histogramas da figura 26. A partir do cálculo das médias da entrada ($\overline{V_{in}}$) e da saída ($\overline{V_{out}}$) do sistema de medição, foi possível encontrar seu ganho,

$$G = \frac{\overline{V_{out}}}{\overline{V_{in}}}, \quad (4.3)$$

que foi usado para gerar o histograma da saída esperada, $V_{out_{esperado}}$.

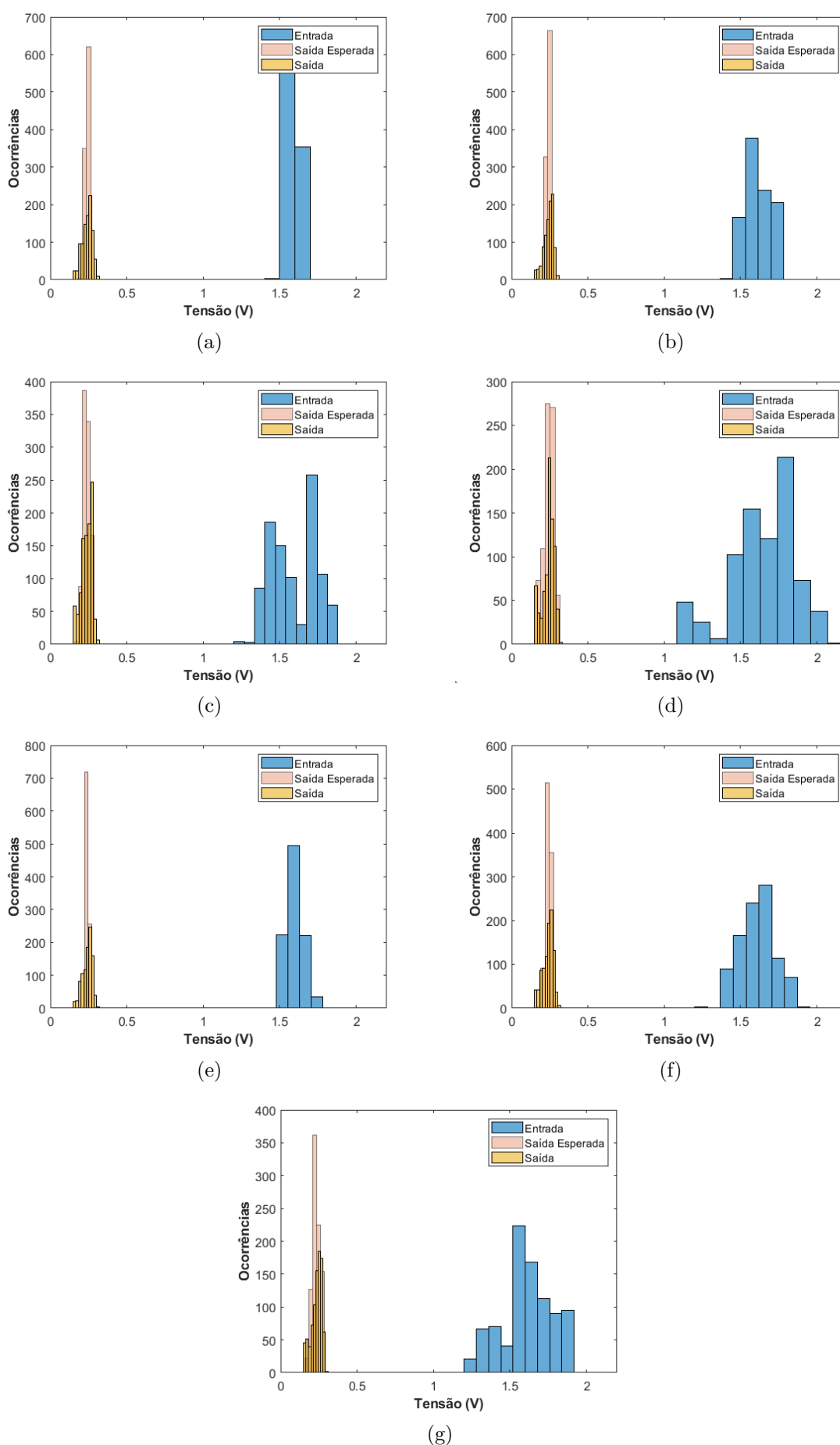


Figura 26 – Histogramas para os dados selecionados do experimento de uniformidade do sensoriamento. (a) Conjunto 1, (b) Conjunto 2, (c) Conjunto 3, (d) Conjunto 4, (e) Conjunto 5, (f) Conjunto 6 e (g) Conjunto 7.

Observando as informações da tabela 7, vê-se as principais métricas para avaliação desse experimento para cada um dos conjuntos avaliados, ou seja, uma vez que se trata de uma distribuição normal, média e desvio padrão. De maneira mais específica, as médias da entrada e da saída para cada conjunto e os desvios para cada conjunto e para todos os dados. O erro relativo máximo entre as médias da saída esperada e medida é de cerca de 12%, enquanto que o erro relativo da média da saída de todos os conjuntos com respeito à saída esperada é de 2%. Em paralelo, ao observar a última coluna da tabela 7, é possível ver o desvio padrão da saída esperada.

Tabela 7 – Métricas dos histogramas resultantes da análise de uniformidade do sensoramento para cada conjunto dos experimentos

Dados	$\overline{V_{in}}$	$\overline{V_{out}}$	$\overline{V_{out_{esperado}}}$	$\sigma V_{out_{esperado}}$
Conjunto 1	1,590	0,241	0,242	0,006
Conjunto 2	1,620	0,241	0,256	0,012
Conjunto 3	1,591	0,237	0,268	0,022
Conjunto 4	1,650	0,245	0,246	0,033
Conjunto 5	1,590	0,243	0,245	0,010
Conjunto 6	1,611	0,238	0,225	0,016
Conjunto 7	1,602	0,235	0,234	0,024
σ	0,022	0,003	0,01	0,010

Essa métrica foi utilizada para mostrar que, de fato, os maiores valores de desvio são relacionados a maiores valores de distúrbios no sinal, enquanto que o Conjunto 1, sem distúrbio artificial, apresenta o menor desvio. Também é possível notar que os desvios dos Conjuntos 2 a 4 são maiores que os dos Conjuntos 5 a 7, o que é esperado, uma vez que o ruído aditivo inserido no primeiro grupo causa mais distúrbio ao sinal do que o multiplicativo, inserido no segundo.

Vê-se, quantitativamente, que apesar do uso de picos que ocorrem em diferentes instantes para cada sinal avaliado e da presença de desvios de tipos e magnitudes diferentes em cada conjunto, os desvios para cada uma das grandezas analisadas são pequenos e próximos. Esse comportamento ocorre tanto isoladamente quanto em comparação com todos os experimentos realizados. A concordância geral das informações, e a consequente invariância ao tipo do distúrbio e ao instante de ocorrência dos picos, também podem ser avaliadas qualitativamente através dos histogramas da figura 26. Apesar de as entradas de cada conjunto apresentarem diferentes dispersões de acordo com a magnitude do distúrbio, vê-se o alinhamento das médias entre todos os histogramas correspondentes para cada um dos conjuntos. Também é possível notar a sobreposição dos histogramas de saída medida e esperada, a menos de ajustes de ganhos.

Apesar da coerência encontrada nas análises, é possível notar uma região de maior dispersão dos pontos conforme aumenta a amplitude dos picos na entrada do sistema de medição, característica melhor evidenciada na figura 21, que apresentou a curva de

medição modelada a partir dos dados obtidos no experimento de caracterização. De início, pensou-se que tal comportamento era advindo de alguma peculiaridade do sistema ainda não estudada.

Entretanto, ao observar a figura 27, que ilustra a relação entre a amplitude dos picos na entrada ideal e a amplitude dos picos medidos na entrada do sistema de medição, nota-se que o gerador de funções utilizado não entrega o sinal gerado fidedignamente. De fato, há a problemática da diferença dos valores calculados e obtidos dos resistores R escolhidos para produzir as correntes e também o problema da taxa de amostragem, como ilustrado pela figura 10. Entretanto, ainda assim, foi possível observar a característica esperada na curva do sistema de medição, o que não é visto no caso da relação entre as entradas e foi considerado com certa diligência ao se analisar os resultados obtidos e o processo de medição avaliado.

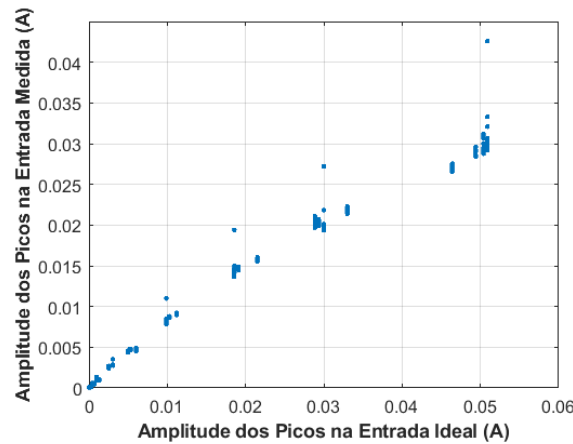


Figura 27 – Relação entre magnitude dos picos de corrente da entrada ideal e da entrada medida.

Devido a esse comportamento, faz-se necessário um comentário a respeito dos valores de amplitude do sinal nominal e dos picos escolhidos para avaliação da uniformidade do sensoramento, $I_{nominal} = I_{pico} = 2,75$ mA. Como ilustrado na figura 28, esses valores são encontrados numa região bem comportada da curva característica do sistema de medição, aparentemente não afetada pela não linearidade do processo de geração. Ainda assim, as medidas foram tomadas para valores bastante pequenos de magnitude do sinal, sendo possível obter resultados concordantes entre si. Tal situação indica o potencial de expansão da medição para valores maiores, uma vez realizadas adequações à configuração experimental utilizada.

Em síntese, esta seção proporcionou uma análise abrangente e aprofundada dos dados coletados ao longo do desenvolvimento deste trabalho de mestrado. Foi possível obter respostas concretas às diversas perguntas guia apresentadas no início da seção, revelando *insights* significativos que contribuem substancialmente para a compreensão do processo de medição em estudo. Essas descobertas ampliam o campo de conhecimento ao apresentar novas perspectivas sobre as sutilezas não só desse processo de medição, mas também dos

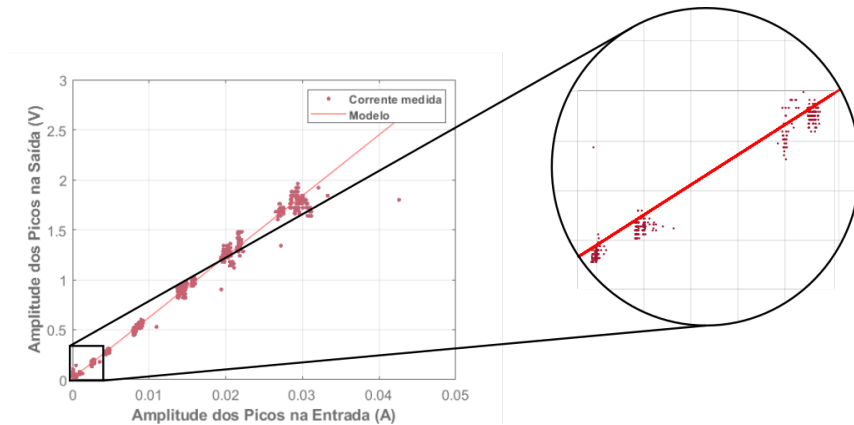


Figura 28 – Detalhe da região em que pode ser encontrado o valor de I_{pico} utilizado na investigação da uniformidade do sensoriamento.

próprios sistemas, sensores e técnicas de processamento do sinal. Dessa forma, os resultados não apenas têm implicações teóricas valiosas, mas também oferecem orientações práticas para abordagens futuras e decisões relacionadas à aplicação, o que está em consonância com os objetivos do trabalho e com a natureza intrínseca de um mestrado acadêmico.

5 Conclusões

Este trabalho teve seu desenvolvimento motivado inicialmente pela problemática do sensoriamento de picos no sinal de corrente de fuga de isoladores de alta tensão. De acordo com a revisão bibliográfica realizada, pôde-se perceber que a temática é relevante tanto do ponto de vista técnico quanto do científico, havendo apoio de grandes institutos de pesquisa e governamentais para pesquisas cujo objetivo final seja a otimização do estabelecimento de manutenções preventivas em linhas de transmissão e subestações de energia.

Apesar de as potenciais soluções envolverem necessariamente um desafio de instrumentação a ser superado, notou-se que a literatura favorece o desenvolvimento de técnicas de processamento e análise dos dados em detrimento de aspectos relacionados à caracterização e validação adequada dos sistemas e processos de medição. Tal tendência é inerentemente contraditória ao objetivo final da área, uma vez que o processamento, por mais refinado que seja, não é capaz de corrigir individualmente uma aquisição de informação imprópria. Dessa forma, neste trabalho de mestrado, buscou-se não apenas desenvolver, caracterizar e avaliar um sistema de medição de picos de corrente de fuga para isoladores de alta tensão, mas também investigar cientificamente aspectos relacionados ao próprio processo de medição da grandeza de interesse.

Com relação ao processo de medição, conclui-se que o uso de osciloscópios como sistemas de aquisição de dados é, de maneira geral, indevido ao se tratar da abordagem de análise de picos. O problema principal é a inadequação do próprio processo de medição frente às características do sinal de interesse. No caso do equipamento específico utilizado neste trabalho, viu-se ainda a problemática da baixa taxa de amostragem na janela de observação em relação aos sinais utilizados. Embora possa parecer banal, os resultados aqui obtidos mostram a necessidade da discussão acerca das especificações dos dispositivos de aquisição de dados - temática pouco abordada na literatura relacionada.

Outra falha encontrada na literatura é a falta de discussão, ou até mesmo de apresentação, da relação matemática entre informação medida (entrada) e obtida a partir do processo de medição (saída), i.e., a curva de medição dos sensores utilizados em cada um dos trabalhos. Tal característica é fundamental ao se analisar a adequação das metodologias de processamento e a definição dos procedimentos de reconstrução do sinal de interesse relacionado à grandeza medida.

Nesse sentido, com relação ao sistema de medição propriamente dito, os resultados permitem inferir sobre o comportamento linear da curva que relaciona a corrente de entrada a ser medida com a saída em tensão do sistema. Medidas de desvio padrão e

média mostram que o mesmo comportamento é observado com alto grau de concordância quando os dados são agrupados relativamente à magnitude do distúrbio ou à magnitude da componente fundamental do sinal de corrente de fuga. Foi possível ainda definir limites de operação do sistema de medição de forma relativa à magnitude da nominal. De maneira absoluta, o sistema foi capaz de medir picos de magnitude a partir de $500 \mu\text{A}$.

Também foi observada concordância dos dados quando investigados diferentes tipos de distúrbios, em variadas magnitudes. Mesmo com vários picos ocorrendo em diferentes instantes de ocorrência do sinal, notou-se alinhamento das médias e desvios padrão nas saídas medida e esperada de todos os conjuntos de sinais analisados.

Os experimentos aqui discutidos foram conduzidos com uma configuração experimental que incluiu gerador de função e osciloscópio. É importante notar que esses equipamentos não fazem parte do sistema de medição completo. No entanto, eles desempenharam um papel fundamental ao permitir a avaliação do desempenho do sistema em condições desafiadoras e a análise crítica do processo de medição amplamente utilizado na área.

Embora a definição e avaliação dessas etapas tenha sido meticulosa, é importante reconhecer que o trabalho possui algumas limitações adicionais, como a avaliação em baixa tensão e a omissão da investigação sobre o impacto da interferência eletromagnética na identificação dos picos. No entanto, enfatiza-se que as restrições foram consideradas cuidadosamente na análise dos resultados. Portanto, as conclusões apresentadas neste trabalho permanecem válidas, apesar das limitações identificadas.

Assim, a principal oportunidade de trabalho futuro diz respeito à implementação de um circuito para aquisição dos dados de maneira assíncrona, respeitando a característica esparsa do sinal de interesse. Com isso, pode-se finalizar o projeto de um detector de falhas em isoladores de alta tensão a partir da quantificação e medição dos níveis dos picos de corrente de fuga. O novo sistema completo pode ser avaliado quanto a sua eficácia, nível de incertezas, precisão e usabilidade para a aplicação.

Ramificações deste trabalho de mestrado foram organizadas em forma de artigo científico e aceitas para publicação no *7th International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits, and Transducers*, intituladas como “*Antoniou Gyrator as a Tuner for Current Transformers*” [26] e “*Current Transformer-Based System for Measuring Leakage Current*” [1].

Referências

- [1] Stéphane Carvalho, Graziella Bedenik, Lucas Molina, Elyson Ádan Nunes Carvalho, Ulisses D. E. S. Lebre, and Charles A. C. de Araujo. Current transformer-based system for measuring leakage current. In *2023 7th International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT)*. IEEE.
- [2] Luis Orellana, Jorge Ardila-Rey, Gonzalo Avaria, Marcos A Diaz, Cristian Pavez, Roger Schurch, and Leopoldo Soto. On the relationship between the electromagnetic burst and inductive sensor measurement of a pulsed plasma accelerator. *IEEE Access*, 7:133043–133057, 2019.
- [3] J Rubio-Serrano, MV Rojas-Moreno, J Posada, JM Martínez-Tarifa, G Robles, and JA Garcia-Souto. Electro-acoustic detection, identification and location of partial discharge sources in oil-paper insulation systems. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 19(5):1569–1578, 2012.
- [4] Guillermo Robles, Juan Manuel Martínez-Tarifa, Manuel Gómez-de-la Calle, Gabriel Barroso-de María, and Daniel Izquierdo. Detecting serial arcs in aeronautical applications using inductive sensors. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 58(3):2073–2082, 2021.
- [5] International Electrotechnical Commission et al. Electrical insulating materials used under severe ambient conditions—test methods for evaluating resistance to tracking and erosion, 2007.
- [6] Stefano Frizzo Stefenon, Laio Oriel Seman, Nemesio Fava Sopelsa Neto, Luiz Henrique Meyer, Ademir Nied, and Kin-Choong Yow. Echo state network applied for classification of medium voltage insulators. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 134:107336, 2022.
- [7] Rizwan Ahmed, Taeyong Kim, Youn-Jung Lee, Seongho Jeon, Junsin Yi, In-Hyuk Choi, Ju-Am Son, and Ja-Bin Koo. Online condition monitoring and leakage current effect based on local area environment. *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, 21:144–149, 2020.
- [8] Yan Jiang, Scott G McMeekin, Alistair J Reid, Azam Nekahi, Martin D Judd, and Alan Wilson. Theoretical model of applying radiometry to monitor insulator contamination. In *International Conf. Condition Monitoring and Diagnostics, Jeju, Korea*, 2014.

- [9] Rodrigo J Villalobos, Luis A Moran, Fernando Huenupán, Francisco Vallejos, Roberto Moncada, and Cristian Pesce. A new current transducer for on-line monitoring of leakage current on hv insulator strings. *IEEE Access*, 10:78818–78826, 2022.
- [10] L Hartshorn. A critical resume of recent work on dielectrics. *Journal IEE*, 64:1152, 1926.
- [11] Muhsin Tunay Gençoğlu and Mehmet Cebeci. The pollution flashover on high voltage insulators. *Electric Power Systems Research*, 78(11):1914–1921, 2008.
- [12] Marcelo Martins Werneck, Daniel Moreira dos Santos, Cesar Cosenza de Carvalho, Fábio Vieira Batista de Nazaré, and Regina Celia da Silva Barros Allil. Detection and monitoring of leakage currents in power transmission insulators. *IEEE sensors journal*, 15(3):1338–1346, 2014.
- [13] Shihua Zhao, Xingliang Jiang, Zhijing Zhang, Jianlin Hu, and Lichun Shu. Flashover voltage prediction of composite insulators based on the characteristics of leakage current. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 28(3):1699–1708, 2013.
- [14] Jingyan Li, Wenxia Sima, Caixin Sun, and Stephen A Sebo. Use of leakage currents of insulators to determine the stage characteristics of the flashover process and contamination level prediction. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 17(2):490–501, 2010.
- [15] Lei Lan, Gongda Zhang, Yu Wang, Xishan Wen, Wei Wang, and Huan Pei. The influence of natural contamination on pollution flashover voltage waveform of porcelain insulators in heavily polluted area. *IEEE Access*, 7:121395–121406, 2019.
- [16] Héctor de Santos and Miguel Á Sanz-Bobi. A cumulative pollution index for the estimation of the leakage current on insulator strings. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 35(5):2438–2446, 2020.
- [17] Kleber Franke Portella, Fernando Piazza, Paulo Cesar Inone, Sebastião Ribeiro Jr, Mário Seixas Cabussú, Dailton Pedreira Cerqueira, and Cleuber Sobreira da Silva Chaves. Efeitos da poluição atmosférica (litorânea e industrial) em isoladores da rede elétrica da região metropolitana de salvador. *Química Nova*, 31:340–348, 2008.
- [18] JL Fierro-Chavez, I Ramirez-Vazquez, and G Montoya-Tena. On-line leakage current monitoring of 400 kv insulator strings in polluted areas. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 143(6):560–564, 1996.
- [19] Rafael Castillo-Sierra, Oscar Oviedo-Trespalacios, John E Candelo-Becerra, Jose D Soto, and Maria Calle. A novel method for prediction of washing cycles of electrical insulators in high pollution environments. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 130:107026, 2021.

- [20] Rafael Castillo Sierra, Oscar Oviedo-Trespalacios, John E Candelo, and Jose D Soto. Assessment of the risk of failure of high voltage substations due to environmental conditions and pollution on insulators. *Environmental Science and Pollution Research*, 22:9749–9758, 2015.
- [21] Stéfano Frizzo Stefenon, Nathiella Waldrigues Branco, Ademir Nied, Douglas Wildgrube Bertol, Erlon Cristian Finardi, Andreza Sartori, Luiz Henrique Meyer, and Rafael Bartnik Grebogi. Analysis of training techniques of ann for classification of insulators in electrical power systems. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 14(8):1591–1597, 2020.
- [22] Suhas Deb, Niladri Ray Choudhury, Riddhi Ghosh, Biswendu Chatterjee, and Sovan Dalai. Short time modified hilbert transform-aided sparse representation for sensing of overhead line insulator contamination. *IEEE Sensors Journal*, 18(19):8125–8132, 2018.
- [23] Ran Bi, Haoyu Ma, Hong Jiang, Huajie Zhang, Mengshi Zhao, and Jun Hu. Leakage current of milliamper level measurement scheme based on tmr sensor. In *2023 Panda Forum on Power and Energy (PandaFPE)*, pages 661–665. IEEE, 2023.
- [24] Eduardo Fontana, S Campello Oliveira, F Jd Md M Cavalcanti, R Bandeira Lima, Joaquim F Martins-Filho, and Elio Meneses-Pacheco. Novel sensor system for leakage current detection on insulator strings of overhead transmission lines. *IEEE transactions on power delivery*, 21(4):2064–2070, 2006.
- [25] Dionisios Pylarinos, Kiriakos Siderakis, and Eleftheria Pyrgioti. Measuring and analyzing leakage current for outdoor insulators and specimens. *Rev. Adv. Mater. Sci*, 29(11):31–53, 2011.
- [26] Graziell Bedenik, Stéphane Carvalho, Lucas Molina, Elyson Ádan Nunes Carvalho, Ulisses D. E. S. Lebre, and Charles A. C. de Araujo. Antoniou gyrator as a tuner for current transformers. In *2023 7th International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT)*. IEEE.
- [27] Gyula Besztercey, George G Karady, and Donald L Ruff. A novel method to measure the contamination level of insulators-spot contamination measurement. In *Conference Record of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No. 98CH36239)*, volume 2, pages 369–372. IEEE, 1998.
- [28] Isaias Ramirez-Vazquez and Jose Luis Fierro-Chavez. Criteria for the diagnostic of polluted ceramic insulators based on the leakage current monitoring technique. In *1999 Annual report conference on electrical insulation and dielectric phenomena (Cat. No. 99CH36319)*, volume 2, pages 715–718. IEEE, 1999.

- [29] Antonios E Vlastos and Tor Orbeck. Outdoor leakage current monitoring of silicone composite insulators in coastal service conditions. *IEEE transactions on power delivery*, 11(2):1066–1070, 1996.
- [30] Sergio Campello Oliveira, Eduardo Fontana, Fernando Jose do Monte de Melo, et al. Leakage current activity on glass-type insulators of overhead transmission lines in the northeast region of brazil. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24(2):822–827, 2009.
- [31] M Akbar, R Ullah, and SJMRE Alam. Aging of silicone rubber-based composite insulators under multi-stressed conditions: an overview. *Materials Research Express*, 6(10):102003, 2019.
- [32] N Bashir and H Ahmad. Odd harmonics and third to fifth harmonic ratios of leakage currents as diagnostic tools to study the ageing of glass insulators. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 17(3):819–832, 2010.
- [33] Rafael Castillo Sierra, Oscar Oviedo-Trespalacios, John E Candelo, and Jose D Soto. The influence of atmospheric conditions on the leakage current of ceramic insulators on the colombian caribbean coast. *Environmental Science and Pollution Research*, 22:2526–2536, 2015.
- [34] Dini Fauziah, Heldi Alfiadi, et al. The effect of coating on leakage current characteristic of coast field aged ceramic insulator. In *2017 4th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI)*, pages 1–7. IEEE, 2017.
- [35] Mohammad Aminul Islam, Md Hasanuzzaman, and Nasrudin Abd Rahim. Effect of different factors on the leakage current behavior of silicon photovoltaic modules at high voltage stress. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 8(5):1259–1265, 2018.
- [36] Bystrík Dolník, L’uboš Šárpataky, Iraidia Kolcunová, and Peter Havran. Sensing method using multiple quantities for diagnostic of insulators in different ambient conditions. *Sensors*, 22(4):1376, 2022.
- [37] Isaias Ramirez-Vazquez, Ramiro Hernandez-Corona, and Gerardo Montoya-Tena. Diagnostic of nonceramic insulators aged in a salt fog chamber by using electric field sensor. In *Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, pages 471–474. IEEE, 2004.
- [38] AK Chaou, A Mekhaldi, and M Teguar. Elaboration of novel image processing algorithm for arcing discharges recognition on hv polluted insulator model. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 22(2):990–999, 2015.

- [39] CM Pei, NQ Shu, L Li, ZP Li, and H Peng. On-line monitoring of insulator contamination causing flashover based on acoustic emission. In *2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, pages 1667–1671. IEEE, 2008.
- [40] Hussein Ahmad, MA Salam, Lee Yi Ying, and N Bashir. Harmonic components of leakage current as a diagnostic tool to study the aging of insulators. *Journal of Electrostatics*, 66(3-4):156–164, 2008.
- [41] Riddhi Ghosh, Biswendu Chatterjee, and Sivaji Chakravorti. A novel leakage current index for the field monitoring of overhead insulators under harmonic voltage. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(2):1568–1576, 2017.
- [42] D Maadjoudj, A Mekhaldi, and M Tegar. Flashover process and leakage current characteristics of insulator model under desert pollution. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 25(6):2296–2304, 2018.
- [43] M. M. Werneck, C. C. Carvalho, F. L. Maciel, R. M. Ribeiro, P. Porciuncula, and E. P. Antunes. Relatório técnico: Sistema de monitoramento de corrente de fuga para linhas de transmissão de 500 kv. *Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação*, 2005.
- [44] Andrea Cavallini, S Chandrasekar, Gian Carlo Montanari, and Francesco Puletti. Inferring ceramic insulator pollution by an innovative approach resorting to pd detection. *IEEE Transactions on Dielectrics and electrical Insulation*, 14(1):23–29, 2007.
- [45] Osama E Gouda, Mohamed MF Darwish, Karar Mahmoud, Matti Lehtonen, and Tamer M Elkhodragy. Pollution severity monitoring of high voltage transmission line insulators using wireless device based on leakage current bursts. *IEEE Access*, 10:53713–53723, 2022.
- [46] Tomotaka Suda. Frequency characteristics of leakage current waveforms of an artificially polluted suspension insulator. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 8(4):705–709, 2001.
- [47] Daniar Fahmi, I Made Yulistya Negara, Anisa Kusumaningrum, and Dirman Hariono Santosa. Analysis of contaminant effect on ceramic & polymer insulator surface under artificial environmental condition. In *2017 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*, pages 161–164. IEEE, 2017.
- [48] Chunhua Fang, Yuning Tao, Jianguo Wang, Can Ding, Li Huang, Mi Zhou, Yi Gu, and Yali Wang. Mapping relation of leakage currents of polluted insulators and discharge arc area. *Frontiers in Energy Research*, 9:777230, 2021.

- [49] Rafael Castillo-Sierra, Oscar Oviedo-Trespalacios, John E Candelo, and Jose Daniel Soto-Ortiz. Modeling leakage current of ceramic insulators subject to high pollution levels for improving maintenance activities. *Dyna*, 85(204):364–371, 2018.
- [50] Arnaldo G Kanashiro and Geraldo F Burani. Leakage current monitoring of insulators exposed to marine and industrial pollution. In *Conference record of the 1996 IEEE international symposium on electrical insulation*, volume 1, pages 271–274. IEEE, 1996.
- [51] Ayman H El-Hag, Shesha H Jayaram, and Edward A Cherney. Fundamental and low frequency harmonic components of leakage current as a diagnostic tool to study aging of rtv and htv silicone rubber in salt-fog. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical insulation*, 10(1):128–136, 2003.
- [52] Ali N Jahromi, Ayman H El-Hag, Shesha H Jayaram, Edward A Cherney, M Sanaye-Pasand, and Hosein Mohseni. A neural network based method for leakage current prediction of polymeric insulators. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 21(1):506–507, 2005.
- [53] Ayman H El-Hag, Ali Naderian Jahromi, and Majid Sanaye-Pasand. Prediction of leakage current of non-ceramic insulators in early aging period. *Electric power systems research*, 78(10):1686–1692, 2008.
- [54] Ali A Salem, Rahisham Abd-Rahman, Samir Ahmed Al-Gailani, Muhammad Saufi Kamarudin, Hussein Ahmad, and Zainal Salam. The leakage current components as a diagnostic tool to estimate contamination level on high voltage insulators. *IEEE Access*, 8:92514–92528, 2020.
- [55] Nabila Dhahbi-Megriche and Abderrahmane Beroual. Time–frequency analyses of leakage current waveforms of high voltage insulators in uniform and non-uniform polluted conditions. *IET Science, Measurement & Technology*, 9(8):945–954, 2015.
- [56] Mousalreza Faramarzi Palangar and Mohammad Mirzaie. Diagnosis of porcelain and glass insulators conditions using phase angle index based on experimental tests. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 23(3):1460–1466, 2016.
- [57] Mohamed E Ibrahim and Amr M Abd-Elhady. Rogowski coil transducer-based condition monitoring of high voltage insulators. *IEEE Sensors Journal*, 20(22):13694–13703, 2020.
- [58] BA Luciano and CS Kiminami. Materiais nanocristalinos e suas aplicações na eletroeletrônica. In *Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, São Pedro-SP, 2000.

-
- [59] T Meydan. Application of amorphous materials to sensors. *Journal of magnetism and magnetic materials*, 133(1-3):525–532, 1994.
- [60] Hitachi Metals Group. Common mode choke cores. https://www.hilltech.com/pdf/Hitachi/Datasheets/FINEMET_CMC_Core_FT-3KL_F_Series.pdf, 2014. Acesso em: 15/07/2022.
- [61] Journal of Visualized Experiments (JoVE) Science Education Database. Characterization of magnetic components. <https://www.jove.com/v/10164/characterization-of-magnetic-components>, 2021. Acesso em: 25/07/2022.
- [62] Frank BJ Leferink. Inductance calculations; experimental investigations. In *Proceedings of Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pages 235–240. IEEE, 1996.
- [63] Flávio Bezerra Costa et al. Uma técnica de diagnóstico em tempo real de distúrbios transitórios baseada na transformada wavelet para uso em registradores digitais de perturbação. 2010.
- [64] David S Nyce. *Position sensors*. John Wiley & Sons, 2016.
- [65] Alexandre Balbinot and Valner João Brusamarello. *Instrumentação e fundamentos de medidas*, volume 2. Grupo Gen-LTC, 2000.
- [66] Luis Antonio Aguirre. *Introdução à identificação de sistemas—Técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais*. Editora UFMG, 2004.
- [67] Jacob Benesty, Jingdong Chen, Yiteng Huang, and Israel Cohen. Pearson correlation coefficient. In *Noise reduction in speech processing*, pages 37–40. Springer, 2009.