



Universidade Federal de Sergipe
Centro de Ciências Exatas e Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CORRENTE DE
FUGA PARA ISOLADORES DE ALTA TENSÃO

Stéphane Santos Carvalho

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica (DEL) da Universidade Federal de Sergipe (UFS) como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Graduada em Engenharia Eletrônica.

Orientadores: Elyson Ádan Nunes Carvalho
Lucas Molina

São Cristóvão
Novembro de 2022

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CORRENTE DE
FUGA PARA ISOLADORES DE ALTA TENSÃO

Stéphane Santos Carvalho

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC) SUBMETIDO AO CORPO
DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA (DEL)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE (UFS) COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE GRADUADA
EM ENGENHARIA ELETRÔNICA.

Examinado por:

Prof. Elyson Ádan Nunes Carvalho, D.Sc.

Prof. Lucas Molina, D.Sc.

Prof. José Gilmar Nunes de Carvalho Filho, D.Sc.

Prof. Wesley Alves Farias, Me.

SÃO CRISTÓVÃO, SE – BRASIL
NOVEMBRO DE 2022

*Aos meus pais, Maria do Carmo
e José Carlos, por todo amor,
carinho, ajuda, força, fé e
incentivo durante toda a minha
jornada até aqui.*

Agradecimentos

Durante toda a minha vida tive a sorte de encontrar com pessoas maravilhosas no meu caminho, mas desde que entrei no DEL essa sorte foi multiplicada por um fator incrivelmente grande, diria que tende ao infinito, até. Sinto profunda gratidão por tudo que vivi até aqui, por cada coisinha, por mais difícil que tenha sido. Nunca cheguei a conversar com alguém sobre os agradecimentos que são colocados nos TCCs, mas sinto que esse espaço deve ser destinado a essas pessoas que tanto contribuíram para a minha formação tanto acadêmica como profissional. Sendo uma pessoa extremamente seletiva, muitas vezes, se o seu nome aparece aqui, espero que você se sinta muito feliz.

O meu primeiro agradecimento vai para Deus, que me permitiu e tem permitido viver tantas coisas maravilhosas, creio e sei que sem Ele nada disso seria possível. Em seguida, agradeço imensamente aos meus pais, Maria do Carmo e José Carlos, por sempre me apoiarem na realização dos meus sonhos e entender que a minha ausência faz parte de um plano muito maior. Que acordavam na madrugada para preparar o café da manhã e não me deixar sozinha no caminho até o transporte universitário. Aqui, um obrigada ainda mais especial ao meu pai, que mesmo exausto de trabalhar o dia inteiro, muitas vezes no sol e carregando peso, sempre me levava na sua bicicleta e esperava até que eu estivesse dentro do ônibus para então seguir o seu caminho. Como pais, não poderia pedir pessoas melhores. Eles me ensinaram o que é o carinho, o respeito, a família e a irmandade, com o presente da minha irmã caçula Kamilly que amo demais e, mesmo sendo dez anos mais jovem que eu, já me ensinou e ensina muita coisas.

Em seguida, meu agradecimento profundamente imensurável vai para o meu, muito mais que querido, orientador, amigo, conselheiro, psicólogo e, muitas vezes, pai, Elyson Carvalho. Foi ele quem enxergou numa menina meio bobinha um grande potencial que nem ela mesmo enxergava, ainda no início do curso. Foi ele quem me possibilitou viver a maior parte das experiências que tive desde que iniciei a graduação. É ele que revira o mundo inteiro para fazer com que as coisas funcionem, quem abdica, muitas vezes, de momentos especiais com a sua própria família, de noites de sono e lazer. Nunca saberei como agradecer tudo que ele fez e faz por mim, me sinto extremamente sortuda e abençoada por ter uma pessoa como ele na minha vida.

Não poderia jamais deixar de agradecer, também, à minha amiga Graziella Bedenik, que desde o início da minha trajetória acadêmica está presente, e que desde então vem

estando cada vez mais. Sem ela, tenho certeza absoluta, eu não seria a Stéphanie que sou hoje, e não teria conseguido chegar até aqui com tantas conquistas que, para mim, significam tanto. Não tenho palavras para descrever o quanto ela é especial e importante para mim e como a vida e experiências dela impactaram e impactam na minha.

Aqui, deixo um profundo agradecimento aos meus amigos de curso e de pesquisa Paulo Gabriel, Aclécio, Gabriel e Tawan que sempre se fizeram presentes durante esses cinco anos, desde os momentos mais difíceis até os mais felizes. Com eles aprendi que, mesmo quando tudo parece perdido, a amizade salva, revigora e dá esperanças de um amanhã muito melhor, onde tudo vai dar certo. Com isso, deixo também o meu agradecimento a Lavinia, Nayade e Thauanne que fizeram parte de muitos momentos importantes e especiais durante essa trajetória. Agradeço também ao meu amigo Renato Fagundes, por todo tempo dedicado a me ajudar com projetos, disciplinas e tudo mais que se teve direito, sem nunca negar apoio e sempre com muita compreensão. Agradeço a Pedro, que entrou recentemente no melhor grupo de pesquisa dessa universidade e já se fez presente contribuindo para este trabalho.

Obviamente não deixaria de agradecer aos meus, também, orientadores Lucas Molina, Gilmar Carvalho e Matheus Souza, por serem pessoas incríveis e sempre estarem dispostos a ajudar e contribuir com a minha formação acadêmica e pessoal. Por, muitas vezes, abdicarem de momentos de lazer e descanso para tirarem dúvidas e se fazerem sempre presentes. Sou extremamente grata a Deus por ter colocado pessoas como eles na minha vida.

Também não posso esquecer do meu melhor amigo Carlos Eduardo, que me conheceu quando ainda estava no início da graduação e desde então sempre me apoiou e deu forças para que eu não desistisse, mesmo quando parecia impossível. Por todas as palavras de consolo, amor, e compreensão. Por todas as vezes que abdicou de suas próprias tarefas para me auxiliar nas minhas. Por tudo que fez e faz por mim. Tenho certeza que se não fosse a sua ajuda eu não teria chegado onde cheguei.

Deixo um agradecimento a todos os professores que passaram pela minha vida, até esse momento, e que contribuíram tanto para a formação da Stéphanie de hoje. "Heróis de verdade não vestem capas, eles ensinam".

Por fim, agradeço à Eneva S.A, ao INESC P&D Brasil e à ANEEL pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

“C’est le temps que tu a perdu pour ta rose qui fait ta rose si importante.”
(Foi o tempo que dedicaste à tua rosa que a fez tão importante.)

Antoine de Saint-Exupéry, *Le Petit Prince* (O Pequeno Príncipe)

Resumo

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CORRENTE DE FUGA PARA ISOLADORES DE ALTA TENSÃO

Stéphane Santos Carvalho

Novembro/2022

Orientadores: Elyson Ádan Nunes Carvalho
Lucas Molina

Departamento: Engenharia Elétrica (DEL/CCET/UFS)

Isoladores são elementos essenciais para os sistemas elétricos de alta tensão e falhas associadas a esses elementos causam perdas econômicas consideráveis que podem superar seu custo inicial de aquisição e instalação. Além disso, tais falhas podem provocar sobrecarga em outras linhas de transmissão e deixar uma grande área sem fornecimento de energia elétrica. Dentre as causas de falhas ocorridas nos isoladores estão os fatores ambientais associados à poluição. Essa, por sua vez, é bastante preocupante em regiões costeiras, onde os principais poluentes são sais solúveis, como $NaCl$ e Na_2SO_4 , que, na presença de água, são dissolvidos na superfície do isolador levando à formação de um caminho condutor alternativo, acarretando na fuga de corrente nos mesmos. Existem diversas técnicas para a medição dessa corrente, contudo, devido à alta concentração de campo elétrico na área e ao fato de não poder abrir o isolador para realizar a medição, os transformadores de corrente são comumente utilizados. Por esse motivo, essa foi a técnica escolhida para o desenvolvimento deste trabalho, que surgiu a partir da necessidade de medição de corrente de fuga em isoladores na subestação de energia elétrica da Usina Termoelétrica Porto de Sergipe I (UTEPSI), de propriedade da Eneva S.A., localizada próximo à região costeira da Barra dos Coqueiros, Sergipe. Durante o desenvolvimento do sistema de medição, foram feitos experimentos de caracterização do núcleo e realizado um pós-processamento do sinal medido. A partir dos resultados obtidos, observou-se que o protótipo construído foi capaz de medir e recuperar o sinal, mostrando-se adequado e viável para a medição de corrente de fuga em isoladores. Assim, o sistema desenvolvido é capaz de medir correntes de centenas de microamperes a dezenas de miliamperes, na faixa de frequência de 60 Hz a 540 Hz, além de possibilitar o monitoramento e análise contínua da corrente nos isoladores.

Este trabalho é parte do projeto de pesquisa e desenvolvimento "GImpSI – Gestão dos Impactos da Salinidade em Isolamentos”, financiado pela Eneva S.A. no âmbito do Programa de P&D ANEEL (Código ANEEL: PD-11278-0001-2021), e gerido pelo INESC P&D Brasil, com participação de pesquisadores da Universidade Federal de Sergipe, Universidade Federal do Pará, Instituto Federal de Sergipe e Universidade Federal de Santa Catarina.

Palavras-chave: Transformador de corrente, corrente de fuga, isoladores

Abstract

DEVELOPMENT OF A MEASUREMENT SYSTEM OF LEAKAGE CURRENT FOR HIGH VOLTAGE INSULATORS

Stéphane Santos Carvalho

November/2022

Advisors: Elyson Ádan Nunes Carvalho

Lucas Molina

Department: Electrical Engineering (DEL/CCET/UFS)

Insulators are essential elements for high-voltage electrical systems, and failures associated with these elements cause considerable economic losses that can exceed their initial acquisition and installation cost. In addition, such faults can overload other transmission lines and leave a large area without an electricity supply. Among the causes of failures in insulators are environmental factors associated with pollution. This, in turn, is quite worrying in coastal regions, where the main pollutants are soluble salts, such as $NaCl$ and Na_2SO_4 , which, in the presence of water, are dissolved on the surface of the insulator leading to the formation of a conductive path alternative, resulting in leakage of current in them. There are several techniques for measuring this current, however, due to the high concentration of electric field in the area and the fact that it is not possible to open the insulator to perform the measurement, current transformers are commonly used. For this reason, that was the technique chosen for the development of this work, which arose from the need to measure leakage current in insulators at the electrical power substation of Usina Termoeletrica Porto de Sergipe I (UTEPSI), owned by ENEVA S.A., located near the coastal region of Barra dos Coqueiros, Sergipe. During the development of the measurement system, core characterization experiments and a post-processing of the measured signal were carried out. From the obtained results, it was observed that the constructed prototype was able to measure and recover the signal, proving to be suitable and viable for measuring leakage current in insulators. Thus, the developed system is capable of measuring currents from hundreds of microamperes to tens of milliamperes, in the frequency range from 60 Hz to 540 Hz, in addition to enabling continuous monitoring and analysis of the current in the insulators.

This work is part of the research and development project "GImpSI – Gestão dos Impactos da Salinidade em Isolamentos", funded by Eneva S.A. under the ANEEL R&D Program (ANEEL Code: PD-11278-0001-2021), and managed by INESC R&D Brazil, with the participation of researchers from the Federal University of Sergipe, Federal University of Pará, Federal Institute of Sergipe and Federal University of Santa Catarina.

Keywords: Current transformer, leakage current, insulators

Sumário

Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xv
Lista de Siglas	xvi
1 Introdução	1
2 Escopo do trabalho	3
2.1 Objetivo geral	3
2.2 Objetivos específicos	3
3 Fundamentação Teórica	5
3.1 Isoladores de Alta Tensão e Falhas Associadas à Poluição Ambiental	5
3.2 Medição de Poluição em Isoladores de Alta Tensão	6
3.3 Sensores de Corrente de Fuga de Alta Tensão	7
3.3.1 Resistor <i>Shunt</i>	7
3.3.2 Sensores Ópticos	8
3.3.3 Transformadores de Corrente	9
3.4 Materiais Utilizados no Desenvolvimento de Núcleos Magnéticos Toroidais	11
4 Estado da Arte	13
4.1 Busca de Mercado	13
4.2 Trabalhos Relacionados	15
5 Desenvolvimento	17
5.1 Metodologia de Desenvolvimento	17
5.2 Procedimentos Experimentais	18
6 Resultados e Discussões	24
6.1 Caracterização do Núcleo	24
6.2 Manipulação e Modelagem do Sistema	31
6.3 Circuito Equivalente do Sensor	37

7 Conclusões	42
7.1 Trabalhos Futuros	43
Referências Bibliográficas	44

Lista de Figuras

3.1	Visualização do princípio básico de funcionamento de um sensor de fibra óptica para medição de corrente. Adaptado de [13].	9
3.2	Visualização do princípio básico de funcionamento de um TC, em que $I(t)$ é a corrente que se deseja medir, $V_L(t)$ a tensão medida no secundário e $H(t)$ o campo gerado. Adaptado de [13].	10
5.1	Diagrama de blocos representando as etapas realizadas para o desenvolvimento deste TCC.	18
5.2	Circuito utilizado para a medição experimental de indutância e permeabilidade magnética em função da frequência. Retirado de [23].	19
5.3	<i>Setup</i> experimental utilizado durante os experimentos de caracterização dos núcleos. (a) Conexões do circuito utilizado; (b) Placa de circuito impresso em placa universal confeccionada para os testes de caracterização.	20
5.4	Núcleos utilizados nos testes de caracterização. (a) Núcleo 1; (b) Núcleo 2.	21
5.5	Núcleos utilizados nos testes de investigação da relação da faixa e qualidade de medição com a quantidade de espiras do TC. (a) Núcleo de 100 espiras; (b) Núcleo de 50 espiras.	21
5.6	Núcleo bipartido utilizado em teste de investigação da relação da faixa e qualidade de medição com a quantidade de espiras do TC.	22
6.1	Comparação da resposta obtida dos núcleos 1 e 2 para a indutância.	25
6.2	Comparação da resposta obtida dos núcleos 1 e 2 para a permeabilidade.	26
6.3	Resposta em frequência obtida para o núcleo não-bipartido com cem espiras, em que o ganho em dB é resultado da aplicação de uma corrente de 7 mA no primário pela tensão medida no secundário.	27
6.4	Resposta em frequência obtida para o núcleo não-bipartido com cinquenta espiras, em que o ganho em dB é resultado da aplicação de uma corrente de 7 mA no primário pela tensão medida no secundário.	28
6.5	Sinal de saída obtido utilizando o núcleo contendo cem espiras. (a) 60 Hz; (b) 200 Hz; (c) 400 Hz; (d) 600 Hz.	28

6.6	Sinal de saída obtido utilizando o núcleo contendo cinquenta espiras. (a) 60 Hz; (b) 200 Hz; (c) 400 Hz; (d) 600 Hz.	29
6.7	Resposta em frequência obtida para o núcleo bipartido com 88 espiras, em que o ganho em dB é resultado da aplicação de uma corrente de 7 mA no primário pela tensão medida no secundário.	30
6.8	Resposta em frequência obtida para o núcleo não-bipartido com mil espiras, em que o ganho em dB é resultado da aplicação de uma corrente de 1 mA no primário pela tensão medida no secundário.	30
6.9	Diagrama de blocos do sistema de condicionamento de sinais desenvolvido.	31
6.10	Condicionador de sinais projetado e implementado. Aqui, V_1 e V_2 são as duas saídas do TC desenvolvido e V_{out} é a saída final do sistema de medição.	32
6.11	PCI confeccionada a partir do circuito desenvolvido. (a) <i>Layout</i> desenvolvido; (b) Visualização 3D do <i>layout</i>	32
6.12	PCI confeccionada a partir do circuito desenvolvido.	32
6.13	(a) Sinal com magnitudes diferentes em cada harmônica de interesse, gerado para simular a corrente de fuga em isoladores; (b) Tensão obtida na saída do circuito de medição, antes do pós-processamento.	33
6.14	(a) Sinal de entrada reconstruído a partir do modelo matemático; (b) Sinal de saída do circuito de medição a partir do modelo identificado.	34
6.15	(a) Sinal de corrente de referência simulando a corrente de fuga no isolador; (b) Sinal de corrente reconstruído com os dados da saída do circuito de medição, após pós-processamento.	35
6.16	Análise do erro associado à medição em cada harmônica separadamente.	36
6.17	Gráfico de tensão por corrente medido na saída do sensor.	36
6.18	Resposta em frequência obtida para o núcleo não-bipartido com cem espiras. Visualização das frequências de corte e central.	37
6.19	Circuito equivalente proposto.	38
6.20	Resposta em frequência obtida para o núcleo não-bipartido com cem espiras em paralelo ao capacitor C_2 de 10 nF.	39
6.21	Núcleo de cem espiras enrolando com fio AWG 20 e AWG 36.	39
6.22	Comparação da resposta em frequência obtida para o núcleo com cem espiras com fio AWG 20 e fio AWG 36.	40
6.23	Valores obtidos dos parâmetros do modelo.	40
6.24	Resposta em frequência obtida a partir do modelo simulado.	41

Lista de Tabelas

4.1	Sensores de corrente comerciais.	14
4.2	Especificações iniciais desejadas para os núcleos.	14
5.1	Valores de Resistores Utilizados Durante os Experimentos de Caracterização e Suas Respectivas Incertezas Associadas.	20
6.1	Resultados da Caracterização para o Núcleo 1.	25
6.2	Resultados da Caracterização para o Núcleo 2.	26

Lista de Siglas

AC Corrente Alternada. 8

DAQ Dispositivo de Aquisição de Dados. 15

DDSE Densidade de Depósito de Sal Equivalente. 6

Fem Força Eletromotriz. 10

FFT Transformada Rápida de Fourier. 15

GIMPSI Gestão dos Impactos da Salinidade em Isolamentos. 2, 42

GPRS Serviço de Rádio de Pacote Geral. 15

PCI Placa de Circuito Impresso. 32

PF Filtro Passa-Faixa. 37, 38, 40, 43

TC Transformador de Corrente. xiii, xiv, 1–3, 5, 9–11, 18, 19, 21–24, 27, 31, 32, 37, 38, 42, 43

TCC Trabalho de Conclusão de Curso. xiii, 2, 3, 5, 7, 12, 13, 15, 17, 18, 22–24, 27, 31, 36, 37, 42, 43

UTE Usina Termelétrica. 2

UTEPSI Usina Termoelétrica Porto de Sergipe I. 2, 3, 14, 17, 22

Capítulo 1

Introdução

Isoladores são elementos essenciais para os sistemas elétricos de alta tensão [1–3]. Eles são responsáveis tanto por fornecer suporte mecânico às linhas de transmissão e distribuição, quanto pelo seu isolamento elétrico [3–5]. Nesse sentido, falhas associadas a esses elementos causam perdas econômicas consideráveis que podem superar seu custo inicial de aquisição e instalação [5]. Além disso, tais falhas podem provocar sobrecarga em outras linhas de transmissão e deixar uma grande área sem fornecimento de energia elétrica [5].

Dentre as causas de falhas ocorridas nos isoladores estão não só os fatores mecânicos, mas também os fatores ambientais. Em regiões costeiras, como é o caso do litoral sergipano, os principais poluentes são sais solúveis, como $NaCl$ e Na_2SO_4 . Tais sais, na presença de água, são dissolvidos na superfície do isolador, levando à formação de um caminho condutor alternativo, acarretando na fuga de corrente nos mesmos [2, 3, 6, 7]. Os riscos desse escape de corrente incluem o acionamento dos dispositivos de proteção, que leva a interrupções nas linhas de distribuição de energia elétrica, podendo, também, acarretar na destruição de todo o isolador [1, 2].

Existem diversos métodos de medição de corrente de fuga, a exemplo de resistor *shunt*, sensor óptico, sensor de efeito Hall e Transformadores de Corrente (TC). Nesse contexto, embora seja empregada como uma solução viável, a medição de corrente de fuga por sensores ópticos possui grandes desafios tecnológicos devido à grande influência de outras variáveis que também interferem na propagação da luz. Já o resistor *shunt* não aparece como uma opção viável, devido à necessidade de realizar uma medição em série no sistema, o que introduziria uma resistência ao aterramento do mesmo, característica que vai contra normas de proteção de sistemas elétricos [8], enquanto que o sensor de efeito Hall se torna inviável em razão da presença de forte campo magnético gerado no ambiente de alta tensão. Nesse contexto, os TCs são apontados como alternativa promissora.

TCs, de modo geral, possibilitam obter informação da corrente que circula no enrolamento primário a partir da medição de corrente no enrolamento secundário [9]. Dessa forma, utilizando um TC é possível realizar o monitoramento contínuo da corrente de fuga

nos isoladores sem a necessidade de abrir o circuito [7, 10]. Devido a essas características, essa foi a técnica escolhida para o desenvolvimento deste trabalho, que surgiu a partir da necessidade de medição de corrente de fuga em isoladores na subestação de energia elétrica da **UTEPSI** (Usina Termoeletrica Porto de Sergipe I), mais especificamente na Usina Termoeletrica Porto de Sergipe I (**UTE**), localizada próximo à região costeira da Barra dos Coqueiros, Sergipe.

Para tanto, foi proposto neste trabalho o desenvolvimento de um sistema de medição de corrente de fuga para isoladores de alta tensão, utilizando um **TC**, que seja capaz de medir correntes de centenas de microamperes a dezenas de miliamperes, na faixa de frequência de 60 Hz a 540 Hz (nona harmônica), além de possibilitar o monitoramento e análise contínua da corrente nos isoladores. Tais especificações foram escolhidas para o sistema com o objetivo de atender às necessidades da **UTEPSI**, de acordo com o proposto durante a execução do Módulo de Instrumentação Eletrônica do projeto **GIMPSI** (Gestão dos Impactos da Salinidade em Isolamentos).

A partir da sua implementação, é esperado obter informações acerca do nível de poluição presente na superfície do isolador, visando fornecer informações úteis aos indicadores de manutenção preventiva dos mesmos. Além disso, este **TCC** traz contribuições não apenas tecnológicas acerca de sensores de corrente de fuga, mas também científicas, através da investigação e análise do modelo elétrico de representação do sensor e do método de medição escolhido.

Este trabalho é parte do projeto de pesquisa e desenvolvimento "GImpSI – Gestão dos Impactos da Salinidade em Isolamentos", financiado pela Eneva S.A. no âmbito do Programa de P&D ANEEL (Código ANEEL: PD-11278-0001-2021), e gerido pelo INESC P&D Brasil, com participação de pesquisadores da Universidade Federal de Sergipe, Universidade Federal do Pará, Instituto Federal de Sergipe e Universidade Federal de Santa Catarina.

Capítulo 2

Escopo do trabalho

Neste capítulo, é apresentado o escopo deste **TCC**, bem como seus objetivos geral e específicos. Este trabalho consiste no desenvolvimento de um sistema de medição que possibilite a medição de corrente de fuga em isoladores de alta tensão para ser aplicado na **UTEPSI**, localizada no município de Barra dos Coqueiros, Sergipe. Para tanto, são estudados os efeitos magnéticos do núcleo do **TC** desenvolvido; formas de medição utilizadas na literatura atual; e sensores de corrente de fuga existentes no mercado.

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste **TCC** consiste no desenvolvimento de um sistema de medição de corrente de fuga para isoladores de alta tensão que seja capaz de medir correntes na faixa de centenas de microamperes a dezenas de miliamperes, na faixa de frequência de 60 Hz a 540 Hz, além de possibilitar o monitoramento e análise contínua da corrente nos isoladores.

2.2 Objetivos específicos

São objetivos específicos deste trabalho:

- Estudar a fundamentação teórica acerca dos temas relacionados;
- Realizar uma revisão bibliográfica acerca de corrente de fuga em isoladores de alta tensão;
- Realizar uma revisão bibliográfica acerca de sistemas de medição de corrente de fuga em isoladores de alta tensão;
- Realizar uma pesquisa de mercado acerca de sensores de corrente de fuga;
- Realizar estudo do núcleo de liga nanocristalina;

- Realizar a montagem e teste do protótipo do sistema de medição;
- Realizar um pós-processamento do sinal de saída para a reconstrução do sinal original;
- Utilizar métricas qualitativas e quantitativas para avaliar a viabilidade da medição de corrente de fuga utilizando o sistema desenvolvido.

Capítulo 3

Fundamentação Teórica

Neste capítulo, é apresentada uma breve fundamentação teórica acerca dos principais conceitos que abrangem a área de conhecimento deste TCC. Ela se inicia com o conceito de isoladores de alta tensão e culmina na apresentação de materiais que são utilizados no desenvolvimento de núcleos toroidais para desenvolvimento de TCs.

Tais conceitos estão separados por seções, com o objetivo de proporcionar uma maior fluidez na leitura.

3.1 Isoladores de Alta Tensão e Falhas Associadas à Poluição Ambiental

Isoladores estão entre os componentes mais importantes nos sistemas de alta tensão. Eles podem ser constituídos de diversos materiais, como ferragens, porcelana, vidro, polímero ou material compósito de cimento, e, uma vez instalados, permanecem em campo por longos períodos [2, 4]

Por possuírem papel fundamental nos sistemas de distribuição, o funcionamento dos isoladores afeta diretamente a qualidade da transmissão de energia elétrica e, consequentemente, o desenvolvimento de uma região [3]. Dessa forma, falhas associadas a esses elementos causam perdas econômicas consideráveis, que podem facilmente superar o custo inicial de aquisição e instalação dos mesmos [5].

Dentre as causas dessas falhas ocorridas nos isoladores estão fatores associados ao tipo de material do qual o isolador é constituído, o arranjo de instalação utilizado e fatores relacionados à poluição aos quais ele está sujeito [1, 2]. Essa, mais especificamente, na presença de umidade, faz com que as partículas dos poluentes se dissolvam na presença de água, criando um caminho alternativo à passagem de corrente, devido à alta tensão das linhas de transmissão, em direção ao terra do sistema, através dos isoladores [2, 4, 10]. A corrente gerada nesse processo, por sua vez, é comumente conhecida na literatura como corrente de fuga.

A partir disso, é notória a influência que o ambiente poluído tem de tornar os isoladores mais suscetíveis ao surgimento de corrente de fuga e, conseqüentemente, descargas sobre sua superfície [2, 4]. Nesse contexto, sistemas elétricos de distribuição localizados em áreas costeiras requerem uma atenção especial, como ressaltado pela norma IEC 8152, que define a poluição por maresia como teor crítico de contaminação [4].

Apesar da corrente gerada nesse processo ser na faixa de dezenas de miliamperes, quando se tem em vista a soma de todos os isoladores instalados, esse valor de corrente passa a ser considerável a ponto de acarretar prejuízos financeiros e operacionais. Além disso, há a possibilidade de acionamento dos dispositivos de proteção, ocasionado pela fuga de corrente através dos isoladores, que leva a interrupções nas linhas de distribuição de energia elétrica, podendo, também, acarretar na destruição de todo o isolador [2].

Por essas razões, é perceptível a necessidade de se obter parâmetros que indiquem o estado de saúde dos isoladores, possibilitando um monitoramento contínuo, que viabilize manutenções preventivas nos mesmos e reduza chances de ocorrências de interrupções nas linhas de transmissão [1, 7]. Diante disso, neste trabalho serão apresentadas as principais técnicas encontradas na literatura para medição de corrente de poluição em isoladores de alta tensão. Tais técnicas serão brevemente apresentadas na Seção 3.2.

3.2 Medição de Poluição em Isoladores de Alta Tensão

Diversas técnicas foram desenvolvidas com o intuito de determinar o nível de poluição em isoladores. São exemplos a Densidade de Depósito de Sal Equivalente (**DDSE**), a medição de resistência da superfície do isolador e abordagens baseadas na detecção de infravermelho e na medição de corrente de fuga [4, 6, 7, 11]. Cada uma dessas técnicas possuem formas diferentes de medição, e as mais utilizadas serão apresentadas nesta seção.

Na **DDSE**, é realizada a lavagem do isolador utilizando água destilada e, após esse processo, é feita a medição da condutividade elétrica da solução. Esse valor é convertido em densidade de depósito de sal equivalente utilizando curvas de resistividade de temperatura e resistividade de concentração de solução de *NaCl*. Por fim, esse valor é dividido pela quantidade equivalente de sal na solução, em *mg*, e pela área de superfície especificada do isolante, em *cm*². Esse processo é repetido diversas vezes, com o objetivo de detectar níveis máximos entre períodos de lavagem natural do isolador [7].

Por outro lado, o método de medição de resistência da superfície do isolador consiste em energizar o isolador em baixa tensão e, dessa forma, medir a resistência da superfície sem remover o contaminante. Essa técnica pode ser aplicada de duas maneiras. A primeira trata-se da medição de resistência superficial do isolador energizado e exposto a condições ambientais de umedecimento. A segunda, por sua vez, consiste em obter a resistência superficial do isolante poluído em função de um tempo de umedecimento artificial, utilizando, para isso, uma câmara de neblina portátil com gerador ultrassônico de

neblina fria [7].

Entretanto, a medição por densidade de depósito de sal equivalente e da resistência da superfície do isolador necessitam de extensos testes e análises laboratoriais, sendo necessário, inclusive, que eles sejam levados do campo para o laboratório para a realização das medições [10]. Essa característica impossibilita a análise contínua e remota do estado dos isoladores, além de consistirem de processos demorados e caros. Nesse contexto, a medição de corrente de fuga vem se mostrando uma abordagem bastante promissora [4, 7, 10].

A medição de corrente de fuga é uma técnica que já vem sendo utilizada por diversos pesquisadores para se obter informações acerca do nível de poluição existente na superfície do isolador [1]. Ela possui uma relação de dependência direta tanto com as condições ambientais, como temperatura e umidade do ar, como também com o nível de poluição acumulada na superfície do isolador. Além disso, ela permite a medição em campo, possibilitando, dessa forma, a coleta de dados de forma remota [7].

De acordo com a literatura científica, a análise harmônica das componentes de frequência ímpares apresentam informações relevantes para a medição de corrente de fuga em isoladores, quando comparada às pares. Assim, considerando uma frequência fundamental de 60 Hz, as 3ª, 5ª, 7ª e 9ª harmônicas têm se mostrado mais significativas [1, 7, 10], o que motivou a medição dessas harmônicas como um dos objetivos específicos deste TCC.

Na Seção 3.3, são apresentadas algumas das técnicas mais utilizadas para medição de corrente de fuga em isoladores.

3.3 Sensores de Corrente de Fuga de Alta Tensão

Existem diversos tipos de sensores e sistemas de medição de corrente. Contudo, nesta seção, serão apresentados apenas os sensores mais utilizados, de acordo com a literatura, para a aplicação específica de medição em isoladores de alta tensão, sendo eles os sensores ópticos, o resistor *shunt* e os transformadores de corrente. Aqui, abordaremos cada um individualmente nas subseções 3.3.1, 3.3.2 e 3.3.3, apresentando uma breve discussão acerca das vantagens e desvantagens de cada um deles.

Para o ferramental teórico apresentado nessas seções, foram utilizados como principais referências bibliográficas [12] e [13].

3.3.1 Resistor *Shunt*

Dentre todos os métodos de medição de corrente, o resistor *shunt* é comumente considerado como primeira opção para a medição de corrente. Isso devido ao fato de que ele apresenta uma maior simplicidade de conversão tensão-corrente e, dessa forma, de medição. Para tanto, o *shunt* é conectado no caminho da corrente que se deseja medir e

sua implementação é geralmente associada a um amplificador, utilizado para amplificar o sinal de saída, e um sistema de aquisição, que tem como objetivo converter a tensão amplificada em um sinal digital, a fim de ser enviado a um possível controlador do sistema. Entretanto, suas aplicações em medição de Corrente Alternada (AC) apresentam algumas desvantagens.

Duas dessas desvantagens são a falta de isolamento galvânico¹ e a influência do efeito pelicular², características que fazem com que a corrente flua por caminhos indesejados do sistema, comprometendo o processo de medição. Ainda, esse fator negativo é amplificado quando colocado sob a perspectiva da alta tensão, devido ao fato de que a dissipação de potência, que é proporcional ao quadrado da corrente que passa pelo *shunt*, influencia negativamente na precisão da medição [12, 13].

Associado a isso, também há o fato de que o resistor *shunt*, a medida que a frequência aumenta, pode apresentar um comportamento não apenas como uma resistência, mas também como uma indutância. Essa característica faz com que seja necessário readequar o ferramental matemático a ser utilizado no processo de aferição da corrente [13].

Por fim, a característica responsável por tornar esse método malquisto para a medição de corrente de fuga em isoladores de alta tensão é o fato de que o *shunt* adiciona uma resistência ao terra do sistema. Essa, por sua vez, é uma condição indesejada pelas normas de segurança para sistemas elétricos [8].

3.3.2 Sensores Ópticos

Sensores ópticos são frequentemente aplicados em sistemas de medição de corrente devido à vantagem de sofrer menor interferência eletromagnética quando comparados a outros métodos [10, 13]. O seu princípio de funcionamento baseia-se, de modo geral, na detecção da forma de onda da corrente de fuga, que gera, por sua vez, um sinal óptico correspondente [6].

Esse tipo de sensor utiliza o princípio de polarização da luz que, ao passar por um meio transparente paralelo a um campo magnético, realiza a detecção do sinal de interesse a ser medido. A sua construção é o resultado do enrolamento da fibra óptica em um fio que permite que a luz se propague paralelamente ao campo H produzido pela corrente no mesmo. Dessa forma, o que é medido, de fato, é a rotação da luz que, por sua vez, é proporcional à corrente de interesse devido ao longo caminho óptico a ser percorrido [12].

Na Figura 3.1 é possível notar a fibra óptica enrolada em volta do condutor, como também a fonte de sinal do sistema, composta pelo diodo *laser* associado ao polarizador. Também é vista a utilização de um analisador, que tem como objetivo converter a

¹Princípio de isolamento de seções funcionais de sistemas elétricos que tem como objetivo evitar o fluxo de corrente, não existindo caminhos de condução metálicos.

²Fenômeno físico que consiste na repulsão entre linhas de corrente elétrica, criando a tendência desta fluir na superfície dos condutores elétricos

modulação de polarização da luz, contendo informações acerca do ângulo de rotação.

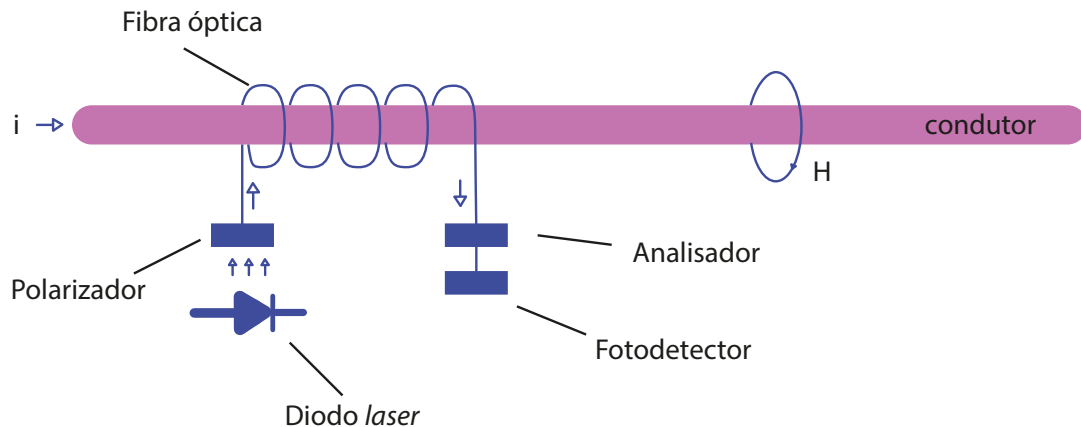


Figura 3.1: Visualização do princípio básico de funcionamento de um sensor de fibra óptica para medição de corrente. Adaptado de [13].

Após décadas de pesquisa e aprimoramento da aplicação prática deste tipo de sensor, foi possível torná-lo apropriado para medições de corrente [13]. Contudo, apesar desses avanços, essa ainda é uma técnica que exige compensação de diversos parâmetros perturbadores, a exemplo da temperatura, pressão e assimetria. Devido a esses parâmetros, é necessário, muitas vezes, realizar diversas medições afim de retirar a significância de suas influências, sendo necessário, também, a utilização de um analisador de polarização no sistema [12, 13].

3.3.3 Transformadores de Corrente

Para aplicações de medição de corrente que trabalham na faixa de frequência em torno de 25 Hz a 400 Hz são comumente utilizados TCs [12]. Para entender, de fato, o funcionamento destes, é necessário conhecer as relações de interação entre correntes e campos magnéticos, apresentadas pelos físicos Maxwell e Sommerfeld [12].

Nesse contexto, é importante destacar que apesar de frequentemente o campo magnético ser representado pela densidade de campo magnético B , essas duas grandezas representam fenômenos diferentes e estão relacionadas por

$$B = \mu\mu_0 H, \quad (3.1)$$

sendo μ a constante magnética do material (adimensional) e $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \frac{H}{m}$ permeabilidade do espaço livre. Embora μ seja frequentemente tratada como constante, ela é uma variável dependente da frequência cujos valores variam de acordo com o material magnético utilizado [12].

O campo H é sempre perpendicular à direção do fio, em todos os pontos, obedecendo à regra da mão direita, e é o responsável por possibilitar a medição da corrente sem contato

com o fio. Na Figura 3.2, é possível visualizar o campo H na aplicação mais próxima de medição de corrente utilizando TCs, onde se tem o campo no centro de uma espira sendo proporcional à corrente que se deseja medir.

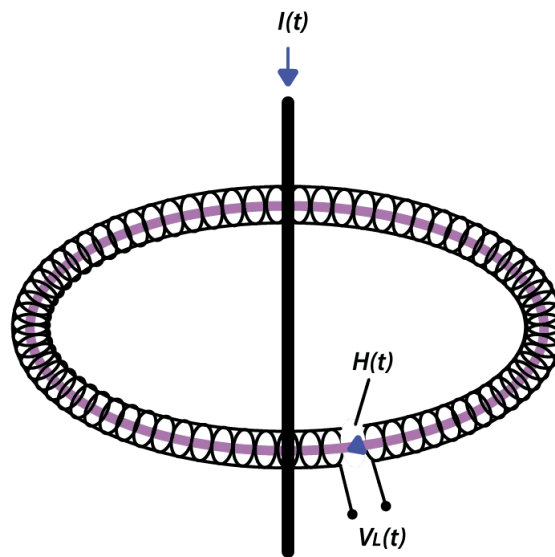


Figura 3.2: Visualização do princípio básico de funcionamento de um TC, em que $I(t)$ é a corrente que se deseja medir, $V_L(t)$ a tensão medida no secundário e $H(t)$ o campo gerado. Adaptado de [13].

Podemos então definir os TCs como um núcleo, constituído de material de alta permeabilidade μ , no qual é enrolado um condutor de corrente, denominado de enrolamento primário, que se relaciona com um enrolamento secundário. Outra utilização bastante empregada para TCs é o primário de apenas uma volta, representado na Figura 3.2 pela barra localizada dentro do enrolamento secundário.

É importante destacar que a configuração toroidal é a mais utilizada na construção de TCs. Isso acontece devido ao fato de que essa geometria possibilita que as linhas de fluxo percorram o material magnético em uma única direção. Isso acarreta numa alta permeabilidade, o que possibilita uma maior sensibilidade para medição de corrente, sem a presença de entreferros transversais. A partir disso, é novamente destacada a importância do material que constitui o núcleo a ser utilizado, pois quanto menor a força coerciva e maior a permeabilidade do mesmo, menor será a corrente de excitação necessária para estabelecer o funcionamento adequado do TC dentro dos limites de exatidão [14].

Nos TCs, a corrente alternada que passa no primário magnetiza o núcleo, criando uma Força Eletromotriz (Fem) e, conseqüentemente, uma corrente no secundário que tende a cancelar o campo gerado pelo enrolamento primário. Contudo, esse cancelamento total acontece apenas se o secundário tiver resistência igual a zero, situação em que a corrente do secundário é igual à corrente no primário dividida pelo número de espiras secundárias, como

$$I_2 = \frac{I_1}{N_2}, \quad (3.2)$$

sendo I_2 e N_2 a corrente e o número de voltas no secundário, respectivamente, e I_1 a corrente no primário.

Entretanto, a resistência do secundário nunca é, de fato, igual a zero e a corrente no primário é medida a partir da tensão induzida no secundário, dada por

$$V_{ind} = -N_2 \cdot \frac{d\phi}{dt}, \quad (3.3)$$

sendo V_{ind} a tensão induzida e N_2 o número de voltas no secundário.

Na Seção 3.4 é apresentada uma breve discussão acerca de materiais utilizados na construção de núcleos magnéticos utilizados para construção de TCs.

3.4 Materiais Utilizados no Desenvolvimento de Núcleos Magnéticos Toroidais

Como visto na subseção 3.3.3, apresentada anteriormente, uma das características mais desejadas para núcleos de TCs é a alta permeabilidade. Nesse contexto, os materiais magnéticos moles ganham destaque, a exemplo das ligas de aço temperado, ligas permalloy, amorfas e nanocristalinas, sendo as duas últimas as mais utilizadas [9, 14].

Ligas amorfas são estruturas formadas por arranjos atômicos aleatórios, sem simetria ou ordenação. São constituídas por elementos metálicos e apresentam alta condutividade elétrica e térmica, possuem alta facilidade de magnetização, elevada dureza e resistência à corrosão. Devido a estas características e ao fato de possuírem um baixo coeficiente de variação entre resistência elétrica e temperatura, ligas amorfas podem ser utilizadas como resistências de precisão e sensores de campo magnético, além de serem bastante empregadas na fabricação de núcleos de transformadores [9].

A partir do avanço das pesquisas e desenvolvimento dessas, um novo material magneticamente mole foi descoberto por Yoshizawa *et al*, em 1988, e relatado em [15]. Esse material, por sua vez, foi denominado de liga nanocristalina, devido à sua estrutura de grãos da fase Fe(-Si) em escala nanométrica na ordem de 1 a 100 nm, e nela foi observada uma maior permeabilidade magnética, quando comparada à das ligas já existentes [9, 16].

Vale destacar que, além dessa alta permeabilidade, foi observada uma baixa força coerciva e baixas perdas por histerese, características que possibilitam a utilização das ligas nanocristalinas em diferentes aplicações eletroeletrônicas, como em sensores, a exemplo dos TCs [14]. Por esses motivos e pela demanda crescente por materiais magneticamente moles mais eficientes, o desenvolvimento e aprimoramento das ligas nanocristalinas vem sendo cada vez mais estimulados [16, 17].

Nesse contexto, para o desenvolvimento do sensor de corrente fuga deste TCC foi escolhido um núcleo de liga nanocristalina modelo MMT521T82.46.35R do fabricante [Magmattec](#).

Capítulo 4

Estado da Arte

Neste Capítulo, é apresentado o estado da arte em medição de corrente de fuga em isoladores de alta tensão. Para isso, será apresentada não apenas a busca de mercado realizada para o desenvolvimento deste TCC, na Seção 4.1, mas também os trabalhos relacionados encontrados na literatura atual, na Seção 4.2.

4.1 Busca de Mercado

Esta seção traz informações a respeito da busca de mercado realizada neste TCC, necessária para familiarização com tecnologias comerciais relacionadas ao sistema desenvolvido. A pesquisa não só oferece conhecimento acerca dos dispositivos e do estado da técnica, mas também serve como guia para a escolha das especificações. Visou-se o conhecimento acerca de dispositivos comercializados, primeiramente, no Brasil e, de forma secundária, no exterior, tanto para medidores de corrente de fuga, quanto para núcleos nanocristalinos.

A busca por sensores de corrente de fuga em isoladores se deu através do buscador do Google, em português e em inglês, utilizando, inicialmente, as palavras-chave “sensor de corrente” e “*current sensor*”, respectivamente.

Nos resultados para a primeira opção, observou-se que o mercado brasileiro oferece diversos medidores, mas que não atingem as especificações desejadas para a medição de corrente de fuga em isoladores de alta tensão. Todos os sensores encontrados tinham como objetivo a medição de uma grande faixa de corrente, a exemplo do sensor HWCT (Tiggercomp, Brasil), com faixa de medição de 0 A a 5 A, apresentando resolução não condizente com o objetivo deste TCC. Dessa forma, não foram encontrados os resultados pretendidos com a pesquisa em português.

Em seguida, foi realizada uma pesquisa utilizando o termo de busca em inglês, na qual foi possível observar que o termo mais adequado seria “*leakage current transducer*”. Com este, foram encontrados alguns sensores com potencial de aplicação, a exemplo do SB6 (Xiamen ztc technology, China), mas que ainda não atendem completamente as

especificações da aplicação, como a faixa de medição em microamperes. Os transdutores que mais se aproximaram das especificações, encontrados a partir desta busca, estão listados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Sensores de corrente comerciais.

Modelo	Faixa de Medição	Diâmetro Interno	Referência
SB6	0 ± 10 mA	45 mm	[18]
SB7	0 - 10 mA	50 mm	[19]
BJ6	0 - 5 mA	45 mm	[20]

Vale destacar que, devido ao fato de não terem sido encontrados sensores de corrente de fuga com a faixa de medição desejada (centenas de microamperes a dezenas de miliampères), foi realizada uma pesquisa de mercado acerca de núcleos toroidais, objetivando o desenvolvimento de um sensor de corrente com as especificações desejadas. Dessa forma, apoiando-se no que foi apresentado na Seção 3.4, foi iniciada a busca por núcleos nanocristalinos.

Essa busca, por sua vez, se deu através do buscador do Google, em português e em inglês, utilizando, inicialmente, as palavras-chave “fabricante de núcleo toroidal” e “*toroidal core*”, respectivamente. As especificações desejadas para tais núcleos são apresentadas na Tabela 4.2, em que a escolha do núcleo bipartido ou não bipartido tem relação direta com a facilidade de instalação, e os diâmetros internos com o tamanho do isolador utilizado pela UTEPSI.

Tabela 4.2: Especificações iniciais desejadas para os núcleos.

Formato	Tipo	Diâmetro Interno
toroidal	bipartido	entre 40 e 50 mm
toroidal	não-bipartido	entre 40 e 50 mm

Nos resultados para a primeira opção, foi observado que os termos “fabricante de transformador de corrente”, “liga amorfa” e “liga nanocristalina” também seriam adequados para a pesquisa. A partir deles, foi possível encontrar o fornecedor [Magmattec](#), que oferece opções de núcleos que satisfazem as especificações desejadas. Vale destacar que não foram encontrados outros fabricantes de núcleos toroidais no mercado brasileiro.

Em seguida, foi realizada uma pesquisa utilizando o termo de busca em inglês e se observou que o mercado estrangeiro oferece opções que satisfazem as especificações desejadas para os núcleos, a exemplo dos fabricantes [Transmart](#) e [Nicore Magnetic Cores](#). Apesar disso, o fabricante brasileiro foi escolhido, devido a uma maior rapidez na entrega do pedido realizado, quando comparado aos fabricantes do exterior.

4.2 Trabalhos Relacionados

Nesta seção são apresentados trabalhos que se relacionam com o objetivo deste TCC. Tais trabalhos foram importantes não apenas para um maior aprofundamento nas técnicas de medição de corrente alternada, mas também para a definição das metodologias de desenvolvimento e experimentos deste trabalho.

Dessa forma, os trabalhos apresentados a seguir tiveram como objetivo desenvolver técnicas que possibilitam a medição da corrente de fuga, como uma forma de viabilizar a manutenção preventiva dos isoladores [3, 7, 21, 22].

Nesse contexto, Salem *et al.* apresentam em [1] um indicador baseado na razão entre as harmônicas ímpares (medindo até a 7^a). O sistema desenvolvido considera o efeito de diferentes níveis de poluição na medição da corrente de fuga e utiliza um Dispositivo de Aquisição de Dados (DAQ) para realizar a medição da corrente.

Bashir *et al.*, por sua vez, apresenta em [21] um sistema de medição que consiste em um resistor *shunt*, um sistema de proteção, um osciloscópio digital e um computador. A forma de medição também se baseou nas relações entre as 3^a, 5^a, 7^a e 9^a harmônicas.

Já em [6], [10] e [2] são utilizados sensores de fibra óptica para a medição da corrente de fuga. O primeiro, apresentado por Oliveira *et al.*, tem como objetivo investigar quantitativamente o efeito da umidade e poluição na corrente de fuga nos isoladores de alta tensão. O segundo, apresentado por Fontana *et al.*, consiste num sistema de medição capaz de monitorar e caracterizar as principais características da corrente de fuga em isoladores em linhas de alta tensão, cujo sensor emite uma amostra da forma de onda da corrente para um processador através de um *link* óptico. O terceiro, por fim, apresentado por Werneck *et al.*, mede, armazena e transmite via GPRS (do inglês, Serviço de Rádio de Pacote Geral) não apenas os dados de corrente de fuga, mas também temperatura local e umidade relativa do ar.

Em [11], Ramirez *et al.* apresentam um sistema de medição de corrente de fuga que utiliza um sensor de campo elétrico. O objetivo foi monitorar a corrente de fuga nos isoladores de alta tensão.

Fierro *et al.*, por sua vez, apresentam em [7] um sistema para medir a corrente de fuga nos isoladores utilizando um TC. Aqui, foram monitoradas tanto a forma quanto a magnitude do sinal de saída de corrente e comparadas com um sistema de medição resistivo.

De forma semelhante, em [22], Villalobos *et al.* apresentam o desenvolvimento de um transdutor para medição e monitoramento *online* de correntes de fuga em cadeias de isoladores de alta tensão. O transdutor desenvolvido é composto por um transformador de corrente, cujo núcleo é bi-partido e constituído de material *supermalloy*. A corrente de fuga é monitorada de forma *on-line* e reconstruída a partir da tensão de saída do transdutor aplicando a Transformada Rápida de Fourier (do inglês, FFT) e sua própria

função de transferência inversa.

A partir dos trabalhos citados anteriormente, é possível notar a variedade de técnicas, abordagens e formas de medição utilizadas para a medição da corrente de fuga em isoladores. Dessa forma, associado à pesquisa de mercado apresentada na Seção 4.1, este capítulo trouxe um apanhado geral acerca do estado da arte para esta aplicação.

Capítulo 5

Desenvolvimento

Neste capítulo, é apresentado o desenvolvimento deste **TCC**. Para isso, são apresentadas as metodologias de desenvolvimento e implementação utilizadas para a construção do sistema de medição de corrente de fuga desenvolvido. Os resultados obtidos a partir dessas metodologias são apresentados no Capítulo 6.

Com o objetivo de facilitar o entendimento da leitura deste **TCC** a partir daqui, é importante ressaltar que o sistema desenvolvido se refere a um protótipo inicial, que teve como objetivo atestar a viabilidade da tecnologia em desenvolvimento. Dessa forma, tal protótipo ainda será, posteriormente, submetido a etapas de maiores especificações, projeto e testes, culminando em um protótipo final, que será testado no ambiente da **UTEPSI**, em alta tensão (500 kV). Dessa forma, o desenvolvimento apresentado a seguir foi realizado e testado em ambiente laboratorial.

5.1 Metodologia de Desenvolvimento

Primeiramente, conforme apresentado na Seção 4.1, foi feita uma pesquisa de mercado, com o objetivo não apenas de entender a situação comercial atual, mas também de avaliar a faixa de medição atendida pelos sensores disponíveis no mercado. Essa etapa foi fundamental para a familiarização com tecnologias comerciais relacionadas ao medidor desenvolvido neste trabalho. Nesse contexto, a pesquisa de mercado não só ofereceu conhecimento acerca dos dispositivos e do estado da técnica, mas também serviu de guia para a escolha de especificações.

Em paralelo a essa etapa, também foi realizado um estudo acerca dos diferentes tipos de materiais que são utilizados para a construção de núcleos toroidais e, logo em seguida, realizada uma pesquisa de mercado acerca dos mesmos. Com a aquisição dos núcleos de teste, foram realizados experimentos de caracterização dos mesmos. O objetivo foi tanto obter informações acerca da permeabilidade magnética e indutância em função da frequência, quanto investigar a forma e o tamanho do núcleo que melhor atendia às especificações do projeto.

Em sequência, após a realização dos experimentos de caracterização, foi feito um pós-processamento do sinal medido, com o objetivo de reconstruir o mesmo, viabilizando a medição de corrente de fuga em isoladores. Por fim, foram realizados testes com o objetivo de modelar analogicamente, ou seja, representar eletricamente, o TC utilizado, visando maior simplicidade na análise da resposta esperada do sensor desenvolvido.

Todas essas etapas realizadas durante o desenvolvimento deste TCC podem ser visualizadas de forma simples a partir do diagrama de blocos apresentado na Figura 5.1.

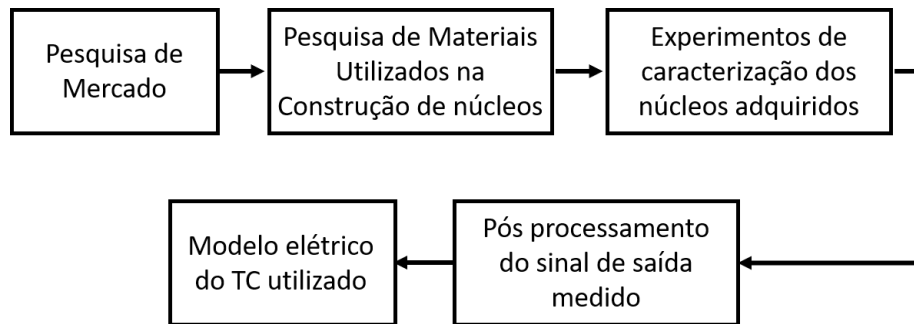


Figura 5.1: Diagrama de blocos representando as etapas realizadas para o desenvolvimento deste TCC.

A metodologia de implementação dos experimentos realizados é apresentada a seguir, na Seção 5.2. Mais detalhes acerca da busca de mercado realizada são apresentados no Capítulo 4.

5.2 Procedimentos Experimentais

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram realizados experimentos com o objetivo de caracterizar o núcleo e de realizar o pós-processamento do sinal medido. Nesta Seção, será apresentada a metodologia de implementação experimental aplicada a cada um destes objetivos.

Inicialmente, foram realizados os experimentos de caracterização dos núcleos adquiridos, cujo material escolhido foi a liga nanocristalina, que é constituída por compostos de grãos da fase $Fe(-Si)$ em escala nanométrica. A escolha deste material foi motivada por vantagens como a alta permeabilidade, estabilidade magnética e elevada densidade de fluxo magnético, como destacado no Capítulo 3. Tais experimentos tiveram como objetivo obter os valores de indutância e permeabilidade magnética dos núcleos em função da frequência. Para isso, foi utilizada a metodologia descrita por Bedenik em [23].

Dessa forma, foi considerado o diagrama elétrico apresentado na Figura 5.2, em que a tensão V_N , tomada nos terminais do indutor, pode ser modelada como a tensão entre a indutância L , que varia em função da frequência ω , em série com uma resistência intrínseca ao indutor R_L , medida através do enrolamento. É importante notar que, dessa forma,

não foi utilizado o modelo ideal de um indutor, mas sim a forma que mais se aproxima do comportamento real do mesmo. Assim, é possível obter diversos pontos de V_N por f que, por sua vez, permitem a obtenção dos valores de permeabilidade magnética e indutância do TC utilizado.

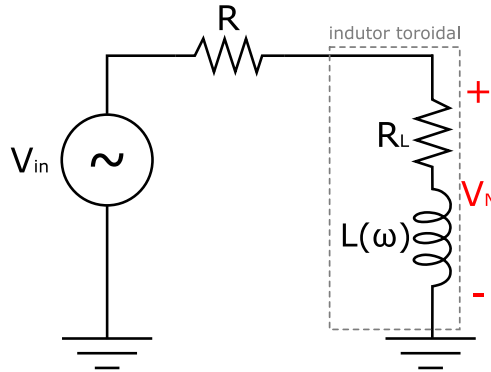


Figura 5.2: Circuito utilizado para a medição experimental de indutância e permeabilidade magnética em função da frequência. Retirado de [23].

De modo geral, a metodologia experimental consistiu em variar o resistor R até encontrar a frequência f em que a tensão V_N fosse $1/\sqrt{2}$ vezes a tensão de entrada, ou seja, $V_n = V_{in}/\sqrt{2}$. Nesse ponto, em que o filtro RL atenua o sinal em, aproximadamente, 70%, é encontrada a frequência de corte do mesmo, na qual a impedância nos terminais de V_N é igual à impedância do resistor R .

Para aquisição dos pontos, foram utilizados os resistores apresentados na Tabela 5.1, com seus devidos valores medidos e incertezas associadas. O sinal de entrada senoidal foi gerado utilizando um gerador de funções e a tensão V_N foi tomada nos terminais de saída do TC. Nesse contexto, buscando minimizar as influências na medição, foi confeccionado e utilizado o circuito impresso em placa universal mostrado na Figura 5.3. Para as medições da tensão de entrada e de saída no indutor foi utilizado um osciloscópio.

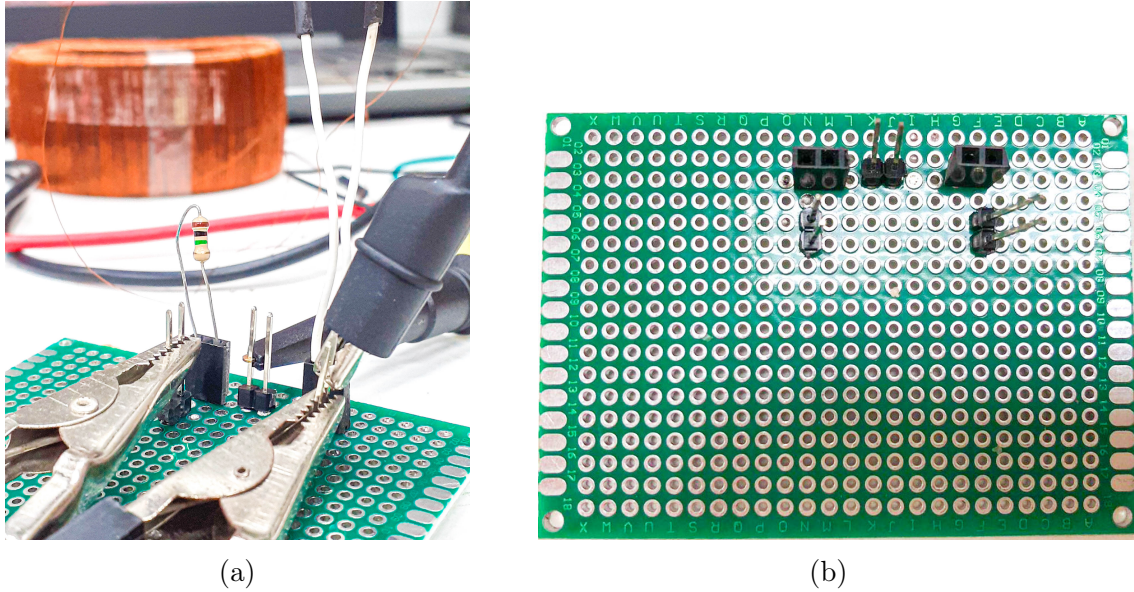


Figura 5.3: *Setup* experimental utilizado durante os experimentos de caracterização dos núcleos. (a) Conexões do circuito utilizado; (b) Placa de circuito impresso em placa universal confeccionada para os testes de caracterização.

Tabela 5.1: Valores de Resistores Utilizados Durante os Experimentos de Caracterização e Suas Respectivas Incertezas Associadas.

R Nominal (Ω)	R Medido (Ω)	Incerteza Nominal
12 k Ω	11,83 k Ω	$\pm 5\%$
18 k Ω	17,74 k Ω	$\pm 5\%$
22 k Ω	21,95 k Ω	$\pm 5\%$
47 k Ω	46,45 k Ω	$\pm 5\%$
56 k Ω	55,89 k Ω	$\pm 5\%$
68 k Ω	67,6 k Ω	$\pm 5\%$
82 k Ω	82,6 k Ω	$\pm 5\%$
100 k Ω	98,7 k Ω	$\pm 5\%$
200k Ω	203,1 k Ω	$\pm 5\%$
390 k Ω	386,3 k Ω	$\pm 5\%$
470 k Ω	460,4 k Ω	$\pm 5\%$
680 k Ω	0,672 M Ω	$\pm 5\%$
820 k Ω	0,854 M Ω	$\pm 5\%$
1 M Ω	1,009 M Ω	$\pm 5\%$
1,8 M Ω	1,819 M Ω	$\pm 1\%$
3,3 M Ω	3,308 M Ω	$\pm 1\%$

Esse experimento foi repetido para dois núcleos toroidais não-bipartidos, constituídos do mesmo material e com mesmo número de espiras ($N = 1000$), mas de dimensões diferentes, como pode ser visto na Figura 5.4, em que os raios internos e externos são de, respectivamente, 23 mm e 41 mm para o núcleo 1, e 20 mm e 25 mm para o núcleo 2. Dessa forma, foi possível realizar a comparação da resposta obtida dos dois núcleos e

definir o que mais se adequou às especificações do projeto do sensor. O resultado obtido é apresentado no Capítulo 6.



Figura 5.4: Núcleos utilizados nos testes de caracterização. (a) Núcleo 1; (b) Núcleo 2.

A partir da escolha das dimensões do núcleo, foram realizados experimentos com o objetivo de investigar a relação da faixa e qualidade de medição com a quantidade de espiras do TC. Para isso, foram feitos cem e cinquenta enrolamentos ($N = 100$ e $N = 50$) em outras duas unidades do núcleo escolhido a partir do teste anterior, como pode ser visto na Figura 5.5, e levantadas suas respostas em frequência.

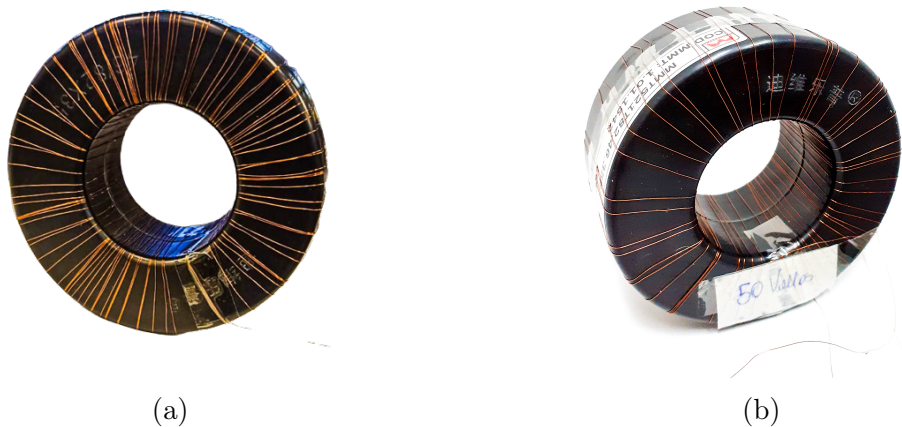


Figura 5.5: Núcleos utilizados nos testes de investigação da relação da faixa e qualidade de medição com a quantidade de espiras do TC. (a) Núcleo de 100 espiras; (b) Núcleo de 50 espiras.

Também foram realizados experimentos utilizando um núcleo com as mesmas dimensões escolhidas anteriormente, mas, dessa vez, bipartido. Este, por sua vez, foi enrolado com oitenta e oito espiras ($N = 88$), como pode ser visto na Figura 5.6. A partir deste

experimento, foi possível definir a forma do núcleo a ser utilizado (bipartido ou não-bipartido).

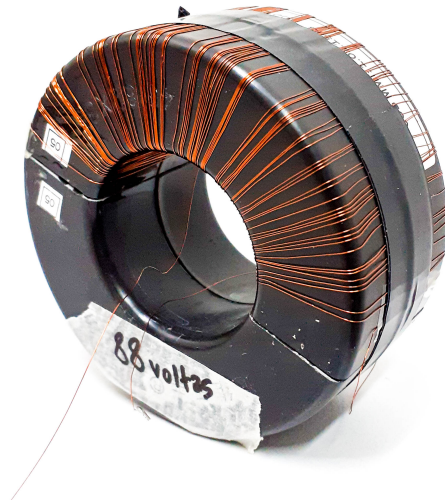


Figura 5.6: Núcleo bipartido utilizado em teste de investigação da relação da faixa e qualidade de medição com a quantidade de espiras do TC.

Vale destacar, ainda, que tais testes de análise em frequência foram realizados utilizando não apenas uma onda senoidal como excitação da corrente de entrada, mas também um sinal construído para simular uma onda senoidal ruidosa, característica que é esperada no campo de aplicação da UTEPSI.

Após a finalização da caracterização do núcleo, tendo escolhido o núcleo a ser utilizado e conhecendo seus valores de permeabilidade e indutância, foi implementado um pós-processamento para o sinal de saída medido, objetivando a reconstrução do sinal original. Tal processamento foi feito utilizando o *software* Matlab e consistiu na suposição de linearidade do sistema, devido aos elementos presentes no mesmo. Dessa forma, foi feito um modelo matemático para o sinal de entrada e um para o sinal de saída, utilizando uma representação do tipo somatório de senoides e regressão linear. Essa etapa não é parte do sistema, mas sim a forma de validação da medição de corrente de fuga utilizando o sistema desenvolvido neste trabalho.

Logo após estas etapas, foram realizados experimentos de identificação do modelo do TC, que objetivaram um melhor entendimento do sensor desenvolvido neste TCC. Para isso, foi utilizada a resposta em frequência do sensor, obtida anteriormente, e feita a análise do resultado.

A partir da análise feita através do diagrama de Bode traçado, foi possível estabelecer a primeira hipótese para o modelo do sensor. Com o objetivo de investigar a veracidade desta hipótese, foram realizados mais experimentos, consistindo na adição de um capacitor em paralelo ao sensor, e na variação da resistência do TC, alterando o diâmetro do fio utilizado no enrolamento das espiras.

Com os resultados destes experimentos, foi possível prosseguir para a modelagem analítica do sensor, determinando os valores dos parâmetros do mesmo. Esta etapa foi uma extensão do que foi proposto para este TCC e possibilitou a simulação do circuito equivalente do TC em *software*, permitindo a visualização da resposta esperada do sensor, através do esquemático elétrico.

Dessa forma, a partir de todas as análises e experimentos realizados, foi possível implementar o circuito final para o sistema de medição de corrente de fuga em isoladores desenvolvido neste TCC. No Capítulo 6, serão apresentados e discutidos todos os resultados obtidos a partir destes experimentos realizados.

Capítulo 6

Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir dos experimentos realizados para o desenvolvimento do sistema de medição de corrente de fuga em isoladores proposto neste TCC. Eles estão organizados em seções, de acordo com o objetivo pretendido em cada um, para um melhor entendimento e fluidez das discussões.

6.1 Caracterização do Núcleo

A partir dos experimentos de caracterização realizados, descritos na Seção 5.2, foi possível obter informações de indutância do TC e permeabilidade dos núcleos. Tais resultados podem ser visualizados nas Tabelas 6.1 e 6.2, em que X representa a relação V_{in}/V_N , apresentada e discutida em [23].

Para os cálculos da indutância e permeabilidade relativa foram utilizadas as equações encontradas em [23], apresentadas, respectivamente, nas equações 6.1 e 6.2.

$$L = \frac{\sqrt{R^2 + 2RR_L + (1 - x^2)R_L}}{2\pi f \sqrt{x^2 - 1}} \quad (6.1)$$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (6.2)$$

sendo $\mu = l \cdot L / N^2 A$ e $\mu_0 = 4e^{-7} \pi$, em que l é comprimento, L é a indutância, N é o número de voltas e A é a área de seção transversal.

Para uma melhor análise dos resultados, nas figuras 6.1 e 6.2 é apresentada a resposta gráfica obtida para indutância e permeabilidade, respectivamente, em função da frequência para cada um dos núcleos utilizados. A partir dessas figuras, é possível observar que há um desempenho satisfatório nas frequências de maior interesse (60 Hz a 540 Hz), para os dois núcleos. Também é possível notar que, nessa faixa, o valor da permeabilidade magnética relativa para ambos é bastante próximo, apesar da diferença significativa nos valores das indutâncias, resultado que já era esperado devido ao fato de ser ter utilizado

Tabela 6.1: Resultados da Caracterização para o Núcleo 1.

R medido (Ω)	Frequência (Hz)	Indutância (H)	Permeabilidade	X
98,70 k Ω	18	321	8,15E+04	2,9
203,1 k Ω	41	290	7,36E+04	2,9
386,3 k Ω	82	276	7,00E+04	2,9
1,819 M Ω	350	304	7,72E+04	2,9
1,009 M Ω	801,6	302	7,67E+04	1,2
672,0 k Ω	997,2	234	5,95E+04	1,1
0,8540 M Ω	1499	137	3,47E+04	1,2
3,308 k Ω	1700	114	2,89E+04	2,9
1,009 M Ω	3060	30,3	7,70E+03	2,0
0,8540 M Ω	3640	21,56	5,48E+03	2,0
672,0 k Ω	4640	13,31	3,38E+03	2,0
1,009 M Ω	4890	12,07	3,06E+03	2,9
0,8540 M Ω	5700	8,76	2,23E+03	2,9
460,4 k Ω	7000	6,05	1,54E+03	2,0
386,3 k Ω	8000	4,44	1,13E+03	2,0
203,1 k Ω	16000	1,17	2,96E+02	2,0
98,70 k Ω	35000	0,260	6,59E+01	2,0
21,95 k Ω	150000	0,014	3,44	2,0
17,74 k Ω	173000	0,010	2,41	2,0
11,83 k Ω	233000	0,005	1,20	2,0

núcleos de mesmo material e apenas dimensões diferentes.

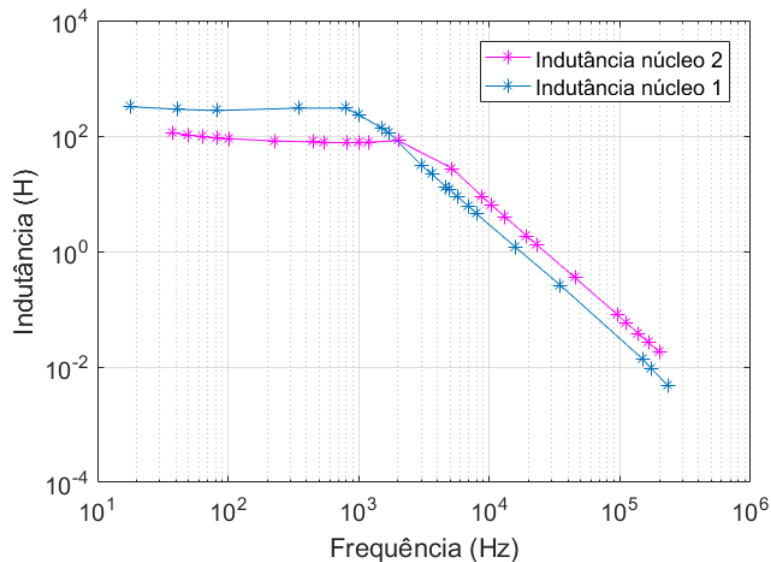


Figura 6.1: Comparação da resposta obtida dos núcleos 1 e 2 para a indutância.

Tabela 6.2: Resultados da Caracterização para o Núcleo 2.

R medido (Ω)	Frequência (Hz)	Indutância (H)	Permeabilidade	X
46,45 k Ω	37,70	113	1,28E+05	2,00
55,89 k Ω	49,20	105	1,18E+05	2,00
67,60 k Ω	64	97,2	1,09E+05	2,00
82,60 k Ω	83	91,5	1,03E+05	2,00
98,70 k Ω	101	89,9	1,01E+05	2,00
203,1 k Ω	228	81,9	9,21E+04	2,00
386,3 k Ω	450	78,9	8,88E+04	2,00
460,4 k Ω	544	77,8	8,75E+04	2,00
0,6720 M Ω	810	76,2	8,58E+04	2,00
0,8540 M Ω	1010	77,7	8,74E+04	2,00
1,009 M Ω	1190	77,9	8,77E+04	2,00
1,819 M Ω	2007	83,3	9,37E+04	2,00
1,819 M Ω	5200	27,3	3,07E+04	2,27
1,009 M Ω	8800	8,96	1,01E+04	2,27
0,8540 M Ω	10300	6,48	7,29E+03	2,27
0,6720 M Ω	13200	3,98	4,47E+03	2,27
460,4 k Ω	19300	1,86	2,10E+03	2,27
386,3 k Ω	23000	1,31	1,48E+03	2,27
203,1 k Ω	45300	0,350	3,94E+02	2,27
98,70 k Ω	95400	0,081	9,10E+01	2,27
82,60 k Ω	111900	0,058	6,49E+01	2,27
67,60 k Ω	138300	0,038	4,30E+01	2,27
55,89 k Ω	166000	0,026	2,96E+01	2,27
46,45 k Ω	200000	0,018	2,04E+01	2,27

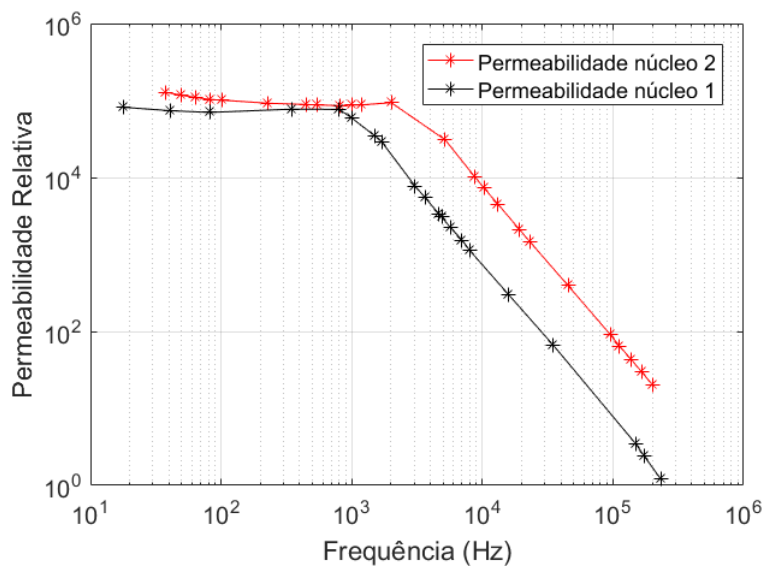


Figura 6.2: Comparação da resposta obtida dos núcleos 1 e 2 para a permeabilidade.

Entretanto, é possível observar que há uma melhor qualidade da informação e maior

facilidade de medição utilizando o núcleo 1 pelo fato da indutância ser significativamente maior neste, na região de interesse. Devido a esse resultado, este foi o núcleo escolhido para o desenvolvimento do sensor de corrente de fuga neste TCC.

Assim, tendo escolhido o núcleo 1 para o desenvolvimento do sensor de fuga deste TCC, foi dada continuidade aos testes, prosseguindo para os experimentos que visaram investigar a relação da faixa e qualidade de medição com a quantidade de espiras do TC. A partir destes, foi possível obter os gráficos de resposta em frequência (Bode) para três TCs diferentes. Nas figuras 6.3 e 6.4 pode ser visto o resultado para o núcleo com cem e cinquenta espiras, respectivamente, em que o ganho em dB é resultado da aplicação da corrente no primário pela tensão medida no secundário.

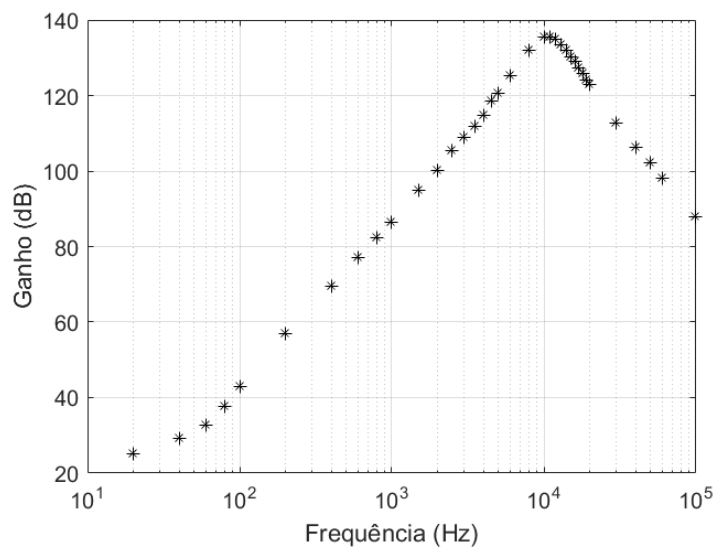


Figura 6.3: Resposta em frequência obtida para o núcleo não-bipartido com cem espiras, em que o ganho em dB é resultado da aplicação de uma corrente de 7 mA no primário pela tensão medida no secundário.

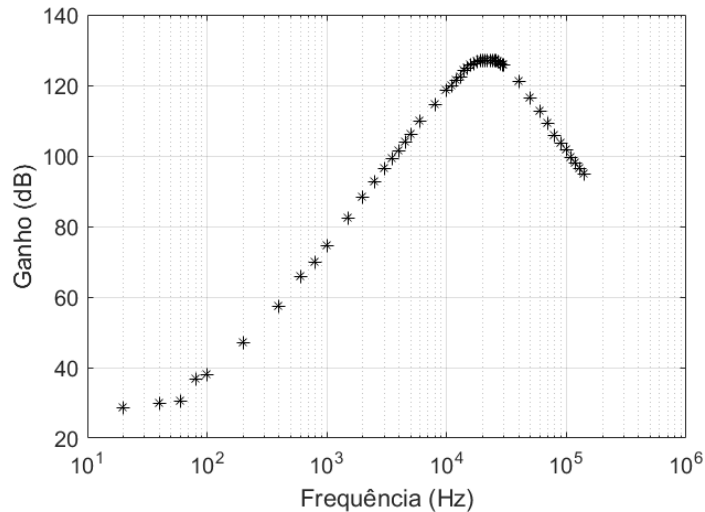


Figura 6.4: Resposta em frequência obtida para o núcleo não-bipartido com cinquenta espiras, em que o ganho em dB é resultado da aplicação de uma corrente de 7 mA no primário pela tensão medida no secundário.

A partir da análise das respostas, e aliado à visualização do sinal de saída, apresentado nas figuras 6.5 e 6.6, foi escolhido o núcleo não-bipartido com cem espiras como o sensor a ser utilizado no desenvolvimento do sistema de medição de corrente de fuga. Esta decisão deve-se ao fato de que este núcleo obteve uma resposta satisfatória na faixa de frequência de interesse (60 Hz a 540 Hz) e uma relação sinal ruído melhor, quando comparado ao núcleo de cinquenta espiras.

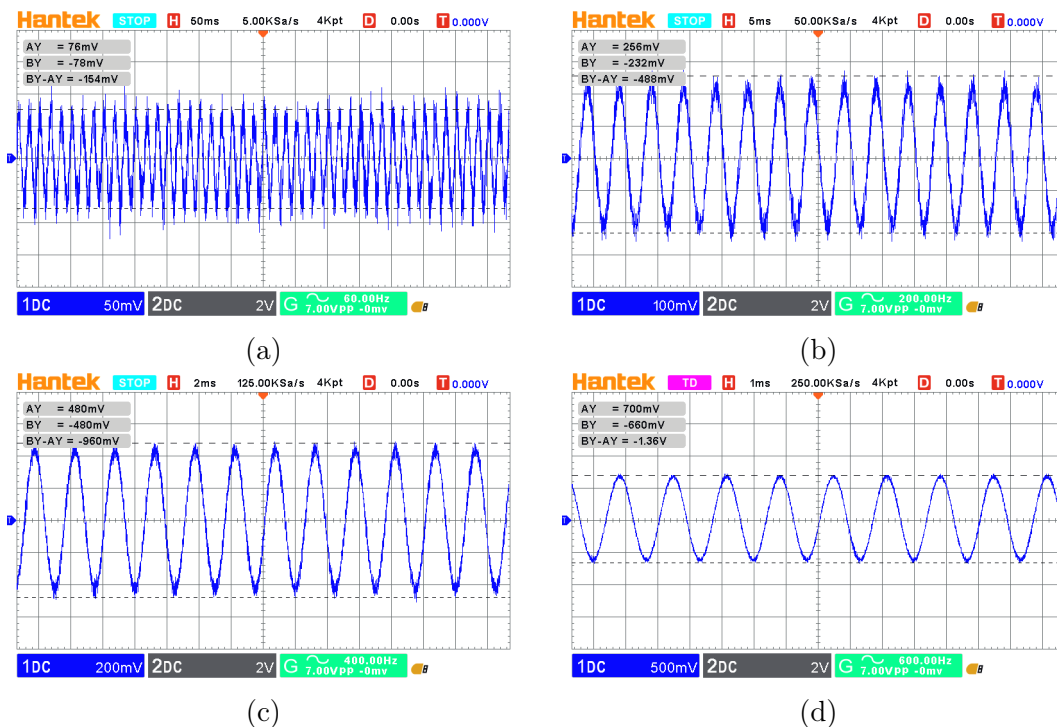


Figura 6.5: Sinal de saída obtido utilizando o núcleo contendo cem espiras. (a) 60 Hz; (b) 200 Hz; (c) 400 Hz; (d) 600 Hz.

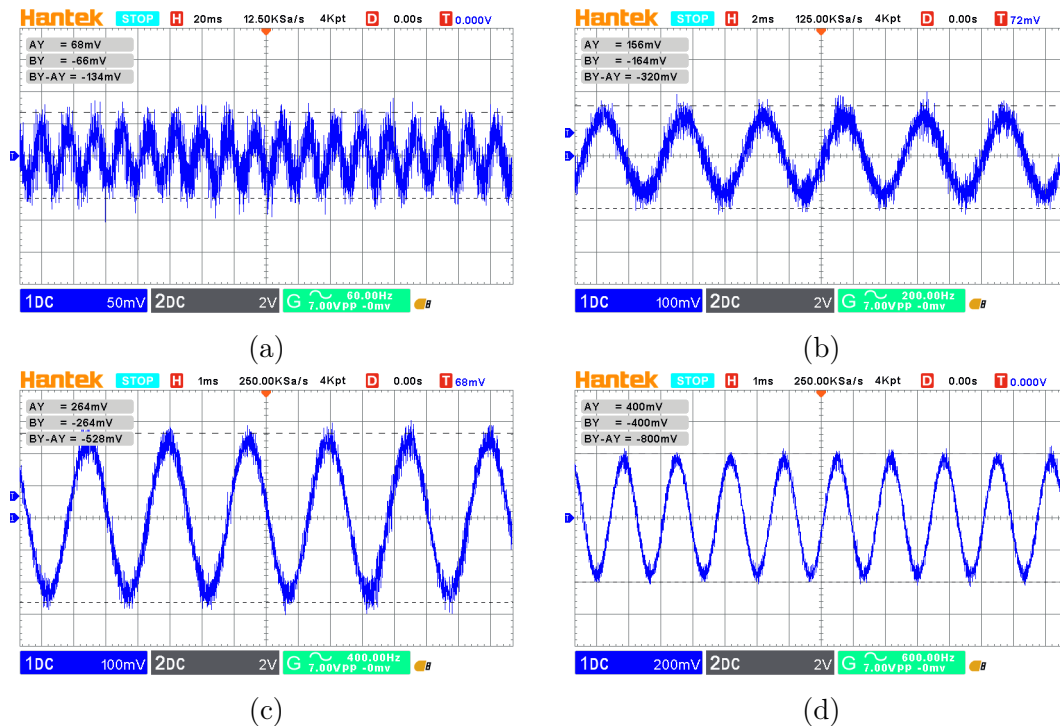


Figura 6.6: Sinal de saída obtido utilizando o núcleo contendo cinquenta espiras. (a) 60 Hz; (b) 200 Hz; (c) 400 Hz; (d) 600 Hz.

Vale a pena ressaltar que, como pode ser visto na Figura 6.7, o terceiro núcleo experimentado, bipartido, não foi capaz de realizar medições na faixa de frequência desejada, o que inviabiliza a utilização do mesmo. Além disso, também é importante destacar que, apesar do núcleo contendo mil espiras ter tido um bom desempenho e resposta em frequência promissora, como pode ser visto na Figura 6.8, ele apresentou menos vantagens quando comparado ao custo e facilidade de reprodução do núcleo contendo cem espiras.

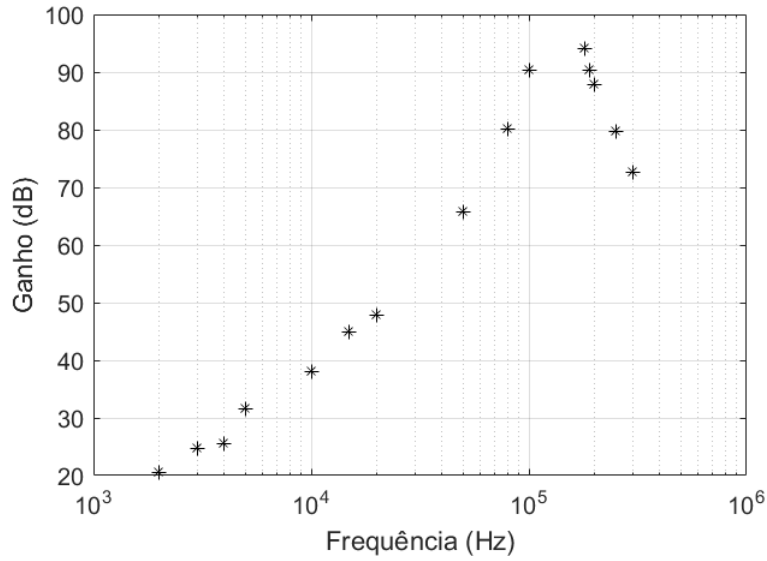


Figura 6.7: Resposta em frequência obtida para o núcleo bipartido com 88 espiras, em que o ganho em dB é resultado da aplicação de uma corrente de 7 mA no primário pela tensão medida no secundário.

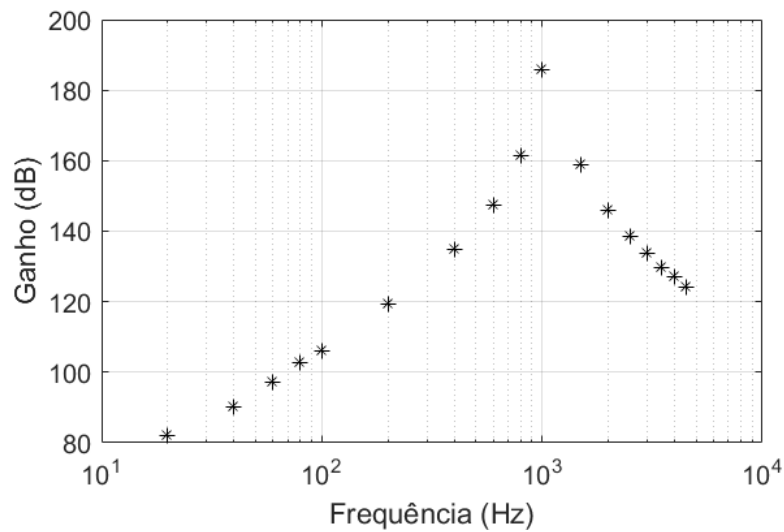


Figura 6.8: Resposta em frequência obtida para o núcleo não-bipartido com mil espiras, em que o ganho em dB é resultado da aplicação de uma corrente de 1 mA no primário pela tensão medida no secundário.

Por fim, a partir dos experimentos realizados utilizando a onda senoidal ruidosa, foi evidenciado que a resposta do núcleo contendo cem espiras é promissora para a medição de corrente de fuga dentro da faixa de frequência desejada.

6.2 Manipulação e Modelagem do Sistema

A partir da caracterização do núcleo, foi possível iniciar o tratamento do sinal de corrente medido pelo sensor. Para isso, foi realizada a implementação do circuito de condicionamento de sinais descrito no diagrama de blocos presente na Figura 6.9, para a aquisição do mesmo.

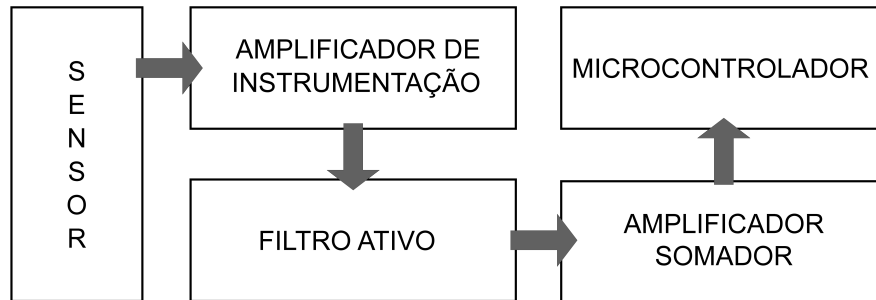


Figura 6.9: Diagrama de blocos do sistema de condicionamento de sinais desenvolvido.

Nesse diagrama de blocos, o sensor é o TC construído. O bloco do amplificador de instrumentação tem o objetivo de reduzir a tensão de modo comum e, conseqüentemente, o ruído em baixas frequências que afeta o pequeno sinal advindo do sensor. Este amplificador foi projetado com um ganho menor que 1, de modo a evitar uma possível saturação do sinal de interesse ao longo de todas as etapas de condicionamento.

O bloco do filtro ativo, por sua vez, tem dois objetivos, sendo o primeiro de reduzir o ruído em altas frequências e o segundo de evitar o recobrimento do sinal em altas frequências, uma vez que seu projeto estabelece corte da banda de passagem em 3 kHz. Essa frequência foi escolhida de forma a não comprometer as harmônicas de interesse, em concordância com o observado na revisão bibliográfica, para garantir uma maior resolução para as medidas nas faixas de frequência mais baixas. Para isso, a topologia *Butterworth* de 4ª ordem se mostrou a mais adequada, já que preserva ganho constante do sinal por praticamente toda a extensão da banda de passagem.

Por fim, o amplificador somador inversor foi implementado com o objetivo de garantir os limites de tensão de entrada analógica para um microcontrolador (0 a 3,3 V), a ser utilizado posteriormente. Dessa forma, o sistema de medição de corrente de fuga em isoladores desenvolvido neste TCC é capaz de entregar o sinal medido pelo sensor pronto para ser adquirido digitalmente. O diagrama elétrico completo do circuito condicionador projetado é apresentado na Figura 6.10.

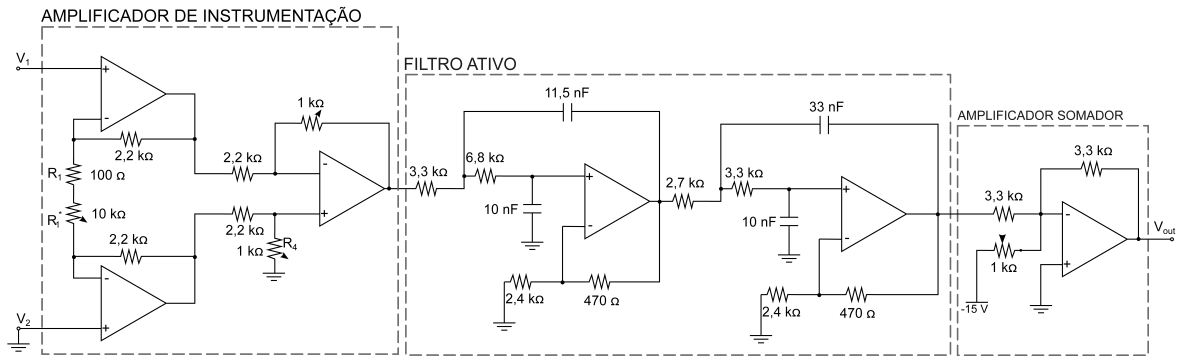
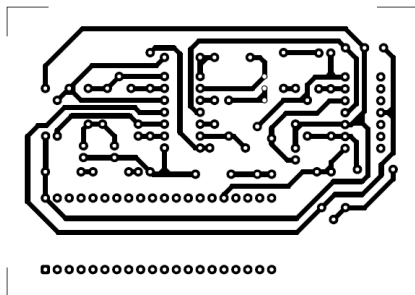
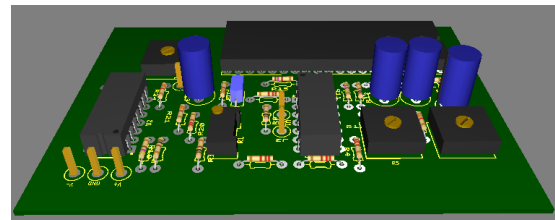


Figura 6.10: Condicionador de sinais projetado e implementado. Aqui, V_1 e V_2 são as duas saídas do TC desenvolvido e V_{out} é a saída final do sistema de medição.

A partir deste circuito, foi confeccionada uma Placa de Circuito Impresso (PCI) do mesmo, como pode ser visto nas figuras 6.11 e 6.12. Com a PCI finalizada, foram realizados testes com o sistema de medição completo, desde a medição de corrente utilizando o TC até a saída do condicionador de sinais projetado. Para isso, foi utilizado um gerador de funções, capaz de carregar e recuperar sinais arbitrários diretamente do/para o computador, o que possibilitou gerar sinais de teste com componentes harmônicas conhecidas.



(a)



(b)

Figura 6.11: PCI confeccionada a partir do circuito desenvolvido. (a) *Layout* desenvolvido; (b) Visualização 3D do *layout*.

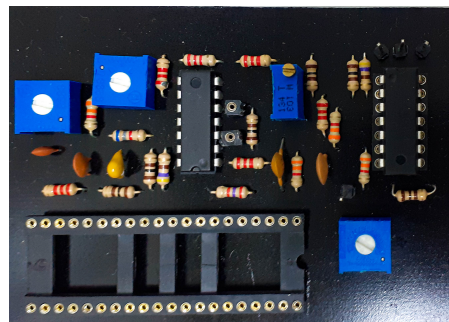


Figura 6.12: PCI confeccionada a partir do circuito desenvolvido.

Aqui, é importante observar que o elemento sensor apresenta magnitudes diferentes na faixa de frequência de interesse (60 a 540 Hz), como pode ser visto na Figura 6.3. Esse comportamento causa uma distorção no sinal medido, por amplificar com ganhos diferentes cada harmônica do sinal.

A fim de investigar e solucionar tal problema, foi criado um sinal periódico, computacionalmente, contendo diferentes magnitudes nas harmônicas de interesse. A partir dele, foi feito um pós-processamento do sinal de saída obtido do sensor e o resultado obtido na etapa inicial pode ser observado na Figura 6.13, onde é possível visualizar a onda gerada e o sinal de saída do sensor.

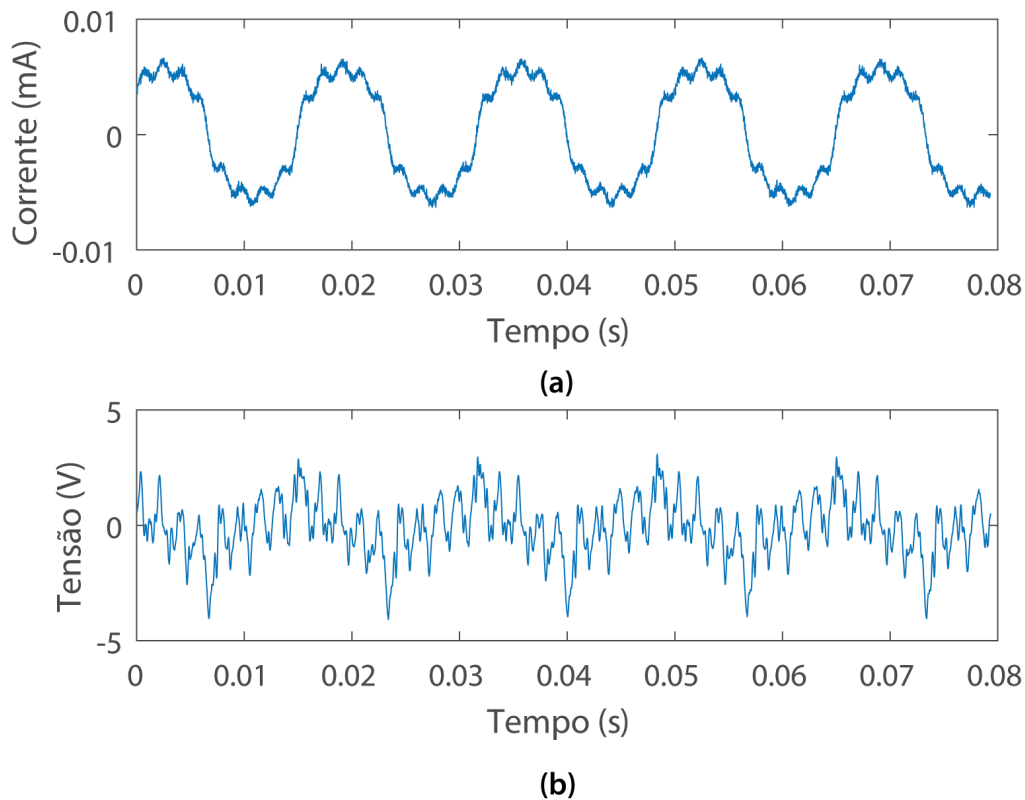


Figura 6.13: (a) Sinal com magnitudes diferentes em cada harmônica de interesse, gerado para simular a corrente de fuga em isoladores; (b) Tensão obtida na saída do circuito de medição, antes do pós-processamento.

O modelo matemático implementado foi baseado na série de Fourier, utilizando o somatório de senos e cossenos, $\cos(n\pi t/T) + \text{sen}(n\pi t/T)$, sendo n = um vetor que varia de um a cinco, t o vetor de tempo e T o período. Os sinais reconstruídos a partir dos modelos matemáticos são apresentados na Figura 6.14, juntamente com os dados coletados para permitir uma melhor visualização do resultado. A partir dessa, é possível observar que os dados obtidos com o modelo gerado representaram de forma bastante fiel os sinais de interesse, tanto o sinal que simula a corrente de fuga, como o sinal medido pelo sensor na saída do filtro.

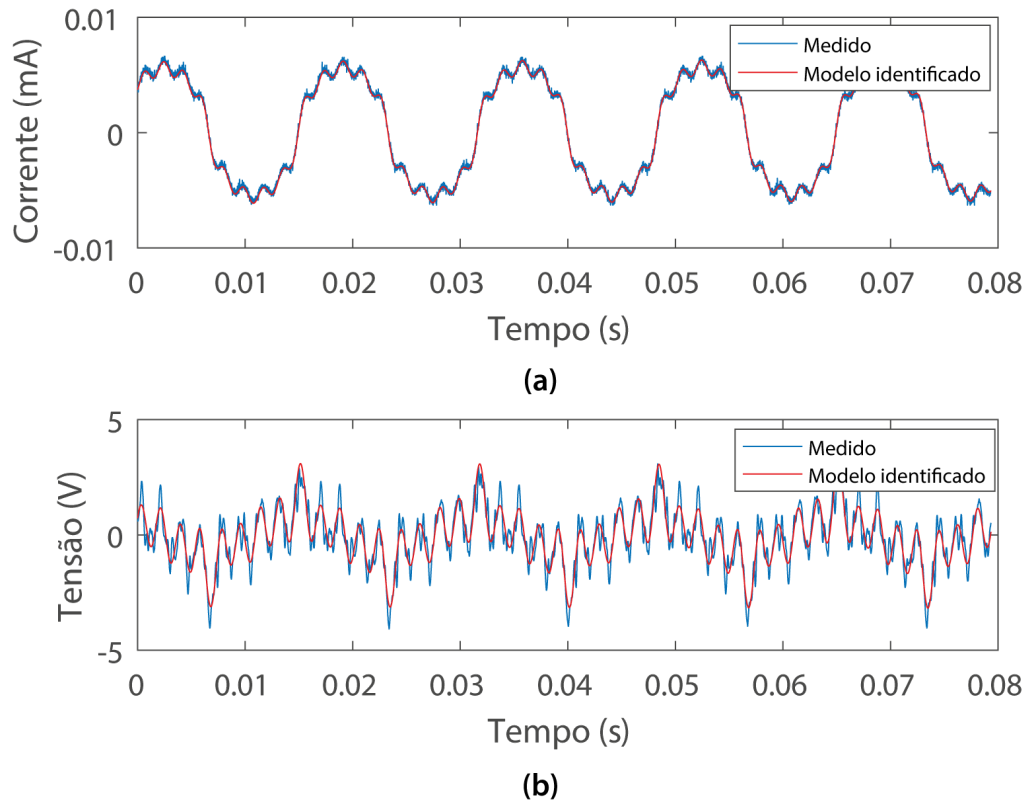


Figura 6.14: (a) Sinal de entrada reconstruído a partir do modelo matemático; (b) Sinal de saída do circuito de medição a partir do modelo identificado.

Uma vez construído o modelo para o sinal, foi possível fazer a inversão do modelo para a recuperação do sinal original da corrente de fuga simulado. O sinal original simulado para a corrente de fuga, contendo informações relevantes até a 9^a harmônica, e o resultado obtido na saída do sensor, incluindo o pós-processamento são apresentados na Figura 6.15.

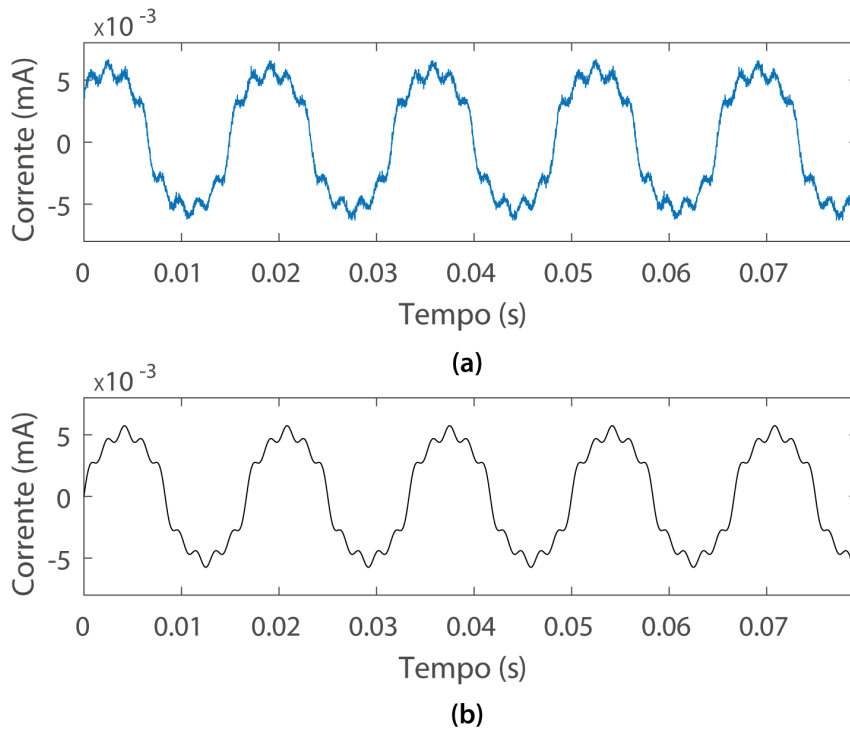


Figura 6.15: (a) Sinal de corrente de referência simulando a corrente de fuga no isolador; (b) Sinal de corrente reconstruído com os dados da saída do circuito de medição, após pós-processamento.

Com exceção de uma diferença de fase, a partir da Figura 6.15, é possível constatar que o sinal medido ao final do processo está em concordância com o sinal original utilizado na entrada do sensor para simular a corrente de fuga do isolador, como é ressaltado na Figura 6.16. Tal resultado possibilitou validar a suposição de linearidade do sensor e do sistema de medição utilizado como um todo.

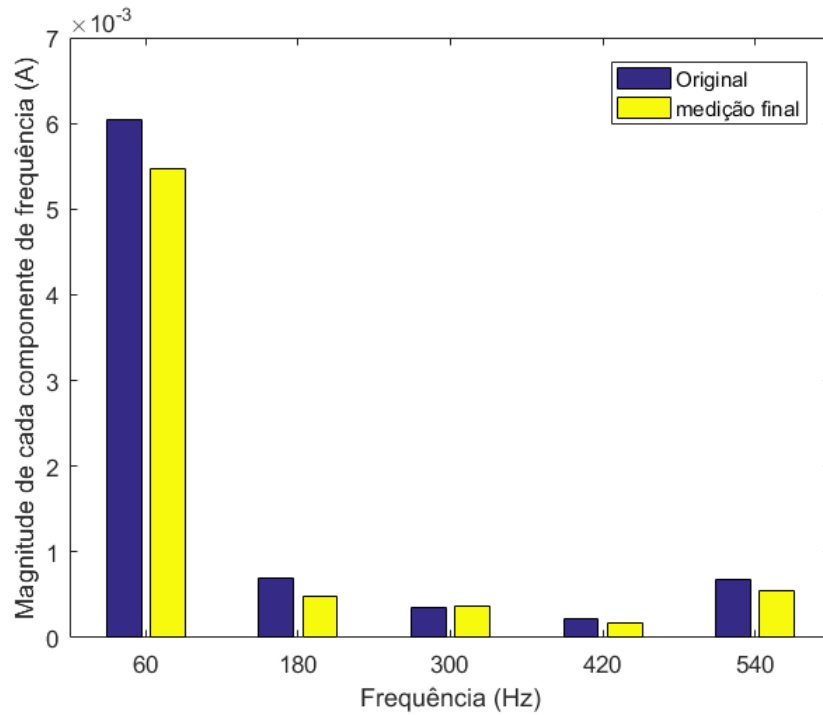


Figura 6.16: Análise do erro associado à medição em cada harmônica separadamente.

A partir da Figura 6.17 é possível visualizar que o sistema desenvolvido foi capaz de medir correntes na faixa de microamperes a dezenas de miliamperes, atendendo as especificações desejadas para este TCC.

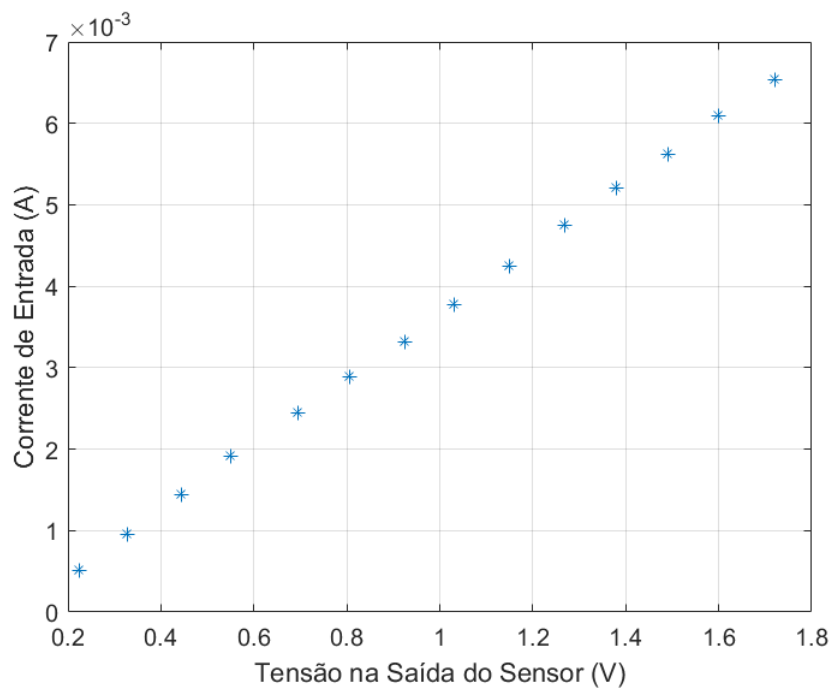


Figura 6.17: Gráfico de tensão por corrente medido na saída do sensor.

Portanto, a partir dos resultados obtidos foi possível verificar que o sistema de medição

desenvolvido é capaz de realizar a medição correta da corrente de fuga nas faixas de frequência e magnitude de interesse.

Como etapa final deste TCC, além do modelo que foi implementado e apresentado nesta seção, foi estudado o circuito equivalente do TC desenvolvido neste trabalho. Tal modelo é de grande interesse pois a partir dele será possível fazer simulações e análises no sistema sem necessariamente aplicar no sensor desenvolvido.

6.3 Circuito Equivalente do Sensor

Com o objetivo de ir além e facilitar a análise do sistema desenvolvido foram, realizados testes de identificação do circuito equivalente do sensor.

Tais testes se iniciaram a partir do resultado obtido do diagrama de Bode para o núcleo contendo cem espiras, visto na Figura 6.3, no qual foi observado que o sistema possui um comportamento semelhante ao de um filtro passa-faixa PF de segunda ordem, cujas frequências de corte inferior, superior e central são, aproximadamente, de 8 kHz, 14 kHz e 11 kHz, respectivamente, como pode ser visto na Figura 6.18.

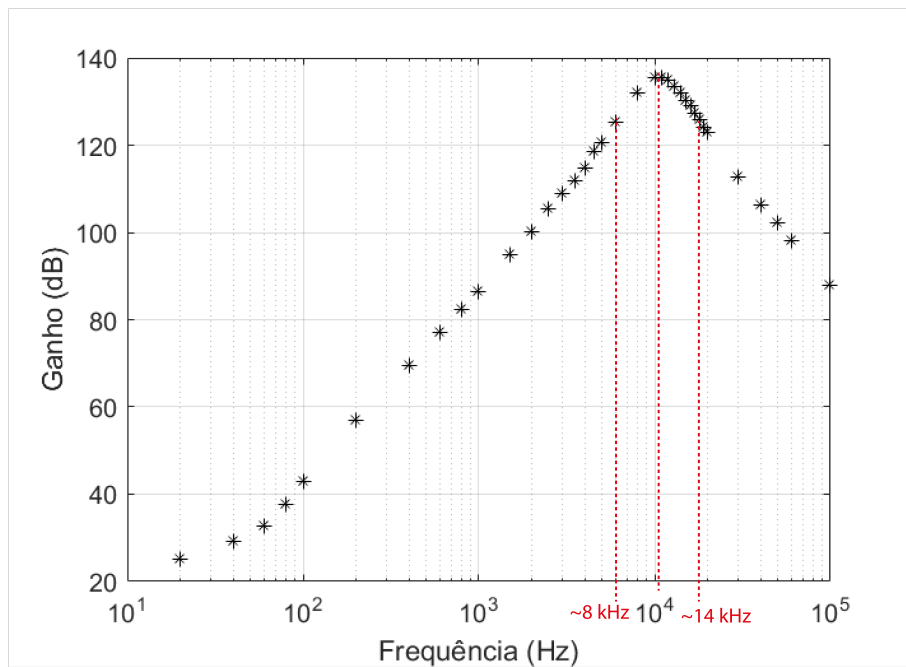


Figura 6.18: Resposta em frequência obtida para o núcleo não-bipartido com cem espiras. Visualização das frequências de corte e central.

Dessa forma, foi suposto que o sistema tem resposta equivalente a um circuito RLC, de acordo com o modelo visto na Figura 6.19.

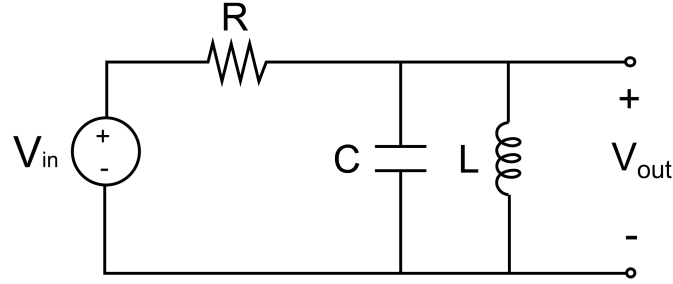


Figura 6.19: Circuito equivalente proposto.

Para verificar o modelo proposto, foram realizados ensaios com o intuito de entender o funcionamento do **TC** construído e estimar os parâmetros do modelo em questão. Nesse contexto, o primeiro ensaio realizado consistiu na inclusão de uma capacitância na saída do sensor. Foram testados individualmente capacitores de 1 nF, 10 nF e 100 nF em paralelo ao mesmo.

No caso de o sensor poder ser representado, de fato, por um filtro passa-faixas RLC, espera-se que um capacitor em paralelo modifique a frequência de ressonância ω_0 e a banda de passagem do filtro BW , já que:

$$\omega_0^2 = \frac{1}{L(C_1 + C_2)}, \quad (6.3)$$

$$BW = \frac{1}{R(C_1 + C_2)}. \quad (6.4)$$

Uma vez que os resultados utilizando os diferentes valores de capacitores têm comportamentos similares, de maneira ilustrativa, na Figura 6.20, é mostrada a resposta em frequência para o sensor em paralelo apenas com o capacitor de 10 nF. A partir desta figura, é possível visualizar que a resposta é condizente com o esperado, havendo encurtamento da banda de passagem e diminuição da frequência de ressonância, fortalecendo a hipótese de que o comportamento do **TC** é, de fato, similar à de um filtro **PF** de segunda ordem.

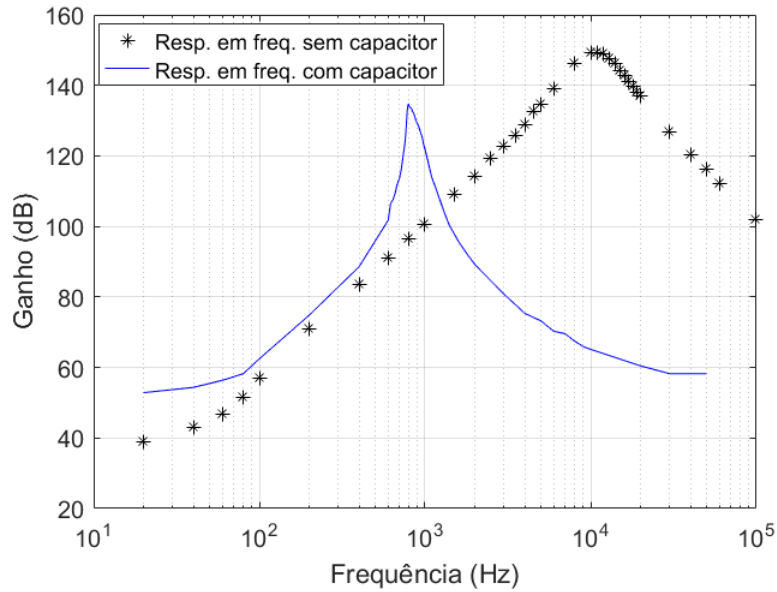


Figura 6.20: Resposta em frequência obtida para o núcleo não-bipartido com cem espiras em paralelo ao capacitor C_2 de 10 nF.

O segundo ensaio, por sua vez, teve como objetivo estudar a influência da resistência do enrolamento. Para tanto, manteve-se a configuração de cem voltas, mas agora com um fio de maior diâmetro (AWG 20, em vez de AWG 36), como pode ser visto na Figura 6.21, visando a diminuição da resistência, que foi de $14,5 \Omega$ para $0,5 \Omega$ (vinte e nove vezes menor). O resultado deste teste pode ser visto na Figura 6.22.



Figura 6.21: Núcleo de cem espiras enrolando com fio AWG 20 e AWG 36.

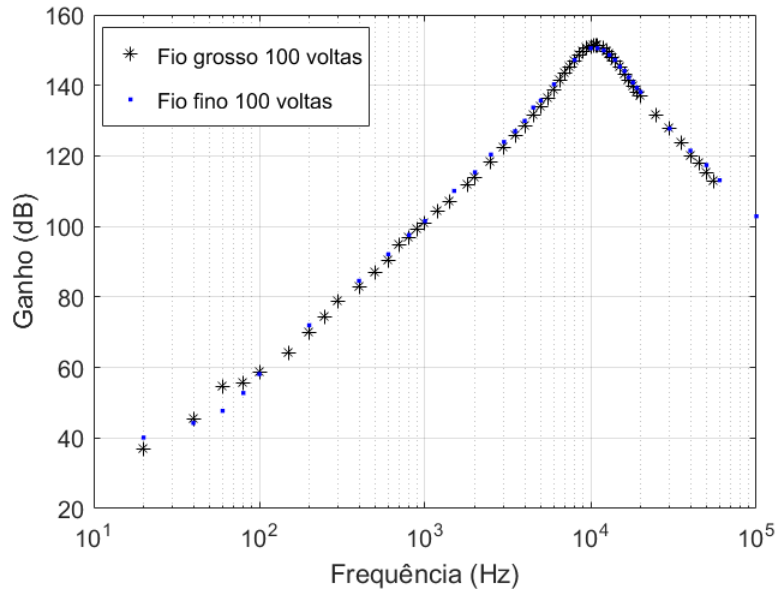


Figura 6.22: Comparação da resposta em frequência obtida para o núcleo com cem espiras com fio AWG 20 e fio AWG 36.

Conforme a Equação 6.4, se a resistência do modelo dependesse da resistência do enrolamento, era esperado um aumento da banda de passagem, o que não ocorreu. Percebeu-se, dessa forma, que a resposta com ambos os enrolamentos é praticamente a mesma, com uma redução praticamente insignificante da banda passante. Entretanto, uma vez que a modificação do enrolamento manteve o comportamento de um PF de segunda ordem, pode-se dizer que a componente resistiva do modelo se deve, então, principalmente, às características do núcleo utilizado e não da resistência do fio.

A partir destes dados, foi possível determinar analiticamente os valores dos parâmetros. Estes, por sua vez, estão apresentados na Figura 6.23.

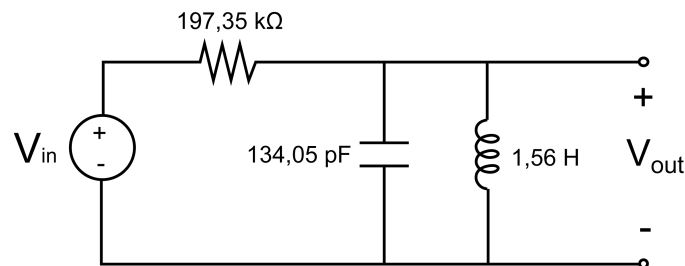


Figura 6.23: Valores obtidos dos parâmetros do modelo.

Como forma de verificação dos parâmetros obtidos, foi feita a simulação do modelo, cuja resposta é apresentada na Figura 6.24. Como pode ser observado, obteve-se com a simulação uma resposta bastante similar à obtida experimentalmente, apresentada anteriormente na Figura 6.18, reforçando que o modelo referente a um PF de segunda ordem

é promissor para a modelagem do sensor desenvolvido.

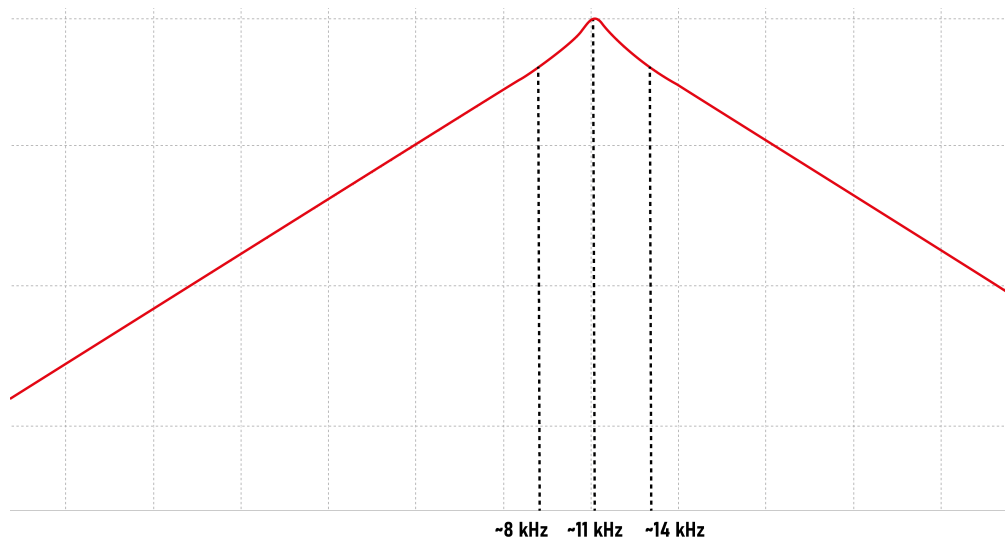


Figura 6.24: Resposta em frequência obtida a partir do modelo simulado.

A partir da obtenção desse modelo, o processo de implementação, testes e análises é facilitado. Dessa forma, além do desenvolvimento do sistema de medição de corrente de fuga, este trabalho trouxe como contribuição científica a determinação do circuito equivalente que possibilita o estudo do comportamento do sistema sem necessariamente realizar testes com o núcleo.

Capítulo 7

Conclusões

Neste TCC foi proposto o desenvolvimento de um sistema de medição de corrente de fuga para isoladores de alta tensão. A partir dos resultados apresentados, observou-se que o protótipo construído foi capaz de medir e recuperar o sinal com grande exatidão, mostrando-se adequado e viável para a medição de corrente de fuga em isoladores.

A partir da fundamentação teórica estudada e da revisão bibliográfica realizada, foi possível entender com maior profundidade as técnicas utilizadas para a medição de corrente de fuga em isoladores. Associado a isso, a pesquisa de mercado possibilitou a visualização e entendimento do panorama atual de sensores de corrente de fuga disponíveis no mercado nacional e internacional e, com o estudo dos materiais utilizados na construção de núcleos para TCs, foi possível concluir que a liga nanocristalina possui grande potencial na construção de sensores de corrente.

Com os resultados apresentados de análises visuais do sinal de saída do sistema e relação de erro entre o sinal esperado e o medido, foi possível avaliar qualitativa e quantitativamente a viabilidade da medição da corrente de fuga com o sistema desenvolvido. Para os experimentos foram considerados sinais de corrente com amplitude inferior a 10 mA, com frequência fundamental em 60 Hz, contendo até a nona componente harmônica (540 Hz).

Dessa forma, a partir desses experimentos, foi possível concluir que o núcleo contendo 100 espiras é capaz de medir correntes na faixa de centenas de microamperes a dezenas de miliamperes, atendendo às especificações iniciais desejadas e, a partir do pós-processamento implementado o objetivo de recuperar o sinal original foi atingido, mantendo a característica de linearidade, bastante desejada em sistemas de medição.

Aqui, vale destacar que o resultado apresentado neste TCC se refere a um protótipo inicial, com o qual foi possível atestar a viabilidade da tecnologia em desenvolvimento. No entanto, tal protótipo ainda será submetido a etapas de maiores especificações, projeto e testes, culminando em um protótipo final, que será testado em ambiente de alta tensão. Todas as etapas são de grande importância para o produto final do módulo de instrumentação, que será adotado como solução no GIMPSI.

Por fim, a partir dos experimentos realizados com o intuito de modelar eletricamente o TC utilizado, foi possível concluir que a suposição de que o sensor desenvolvido possui o comportamento de um circuito PF de segunda ordem é, de fato, promissora.

7.1 Trabalhos Futuros

Como trabalho futuro deste TCC, é prevista a medição de fase do sinal medido, com o objetivo de recuperar corretamente o sinal original não apenas em magnitude, mas também em fase, permitindo recuperar a defasagem original entre as componentes de cada uma das harmônicas de interesse.

Além desta, outra atividade prevista é o estudo e análise de possíveis formas de tornar o ganho do sensor mais constante nas frequências de interesse, melhorando a qualidade do sinal medido e facilitando a reconstrução do sinal na etapa de pós-processamento. Por fim, um maior aprofundamento nas investigações acerca do circuito equivalente do TC é discutido.

Referências Bibliográficas

- [1] Ali A Salem, Rahisham Abd-Rahman, Samir Ahmed Al-Gailani, Muhammad Saufi Kamarudin, Hussein Ahmad e Zainal Salam. The leakage current components as a diagnostic tool to estimate contamination level on high voltage insulators. *IEEE Access*, 8:92514–92528, 2020.
- [2] Marcelo Martins Werneck, Daniel Moreira dos Santos, Cesar Cosenza de Carvalho, Fábio Vieira Batista de Nazaré e Regina Celia da Silva Barros Allil. Detection and monitoring of leakage currents in power transmission insulators. *IEEE sensors journal*, 15(3):1338–1346, 2014.
- [3] M Akbar, R Ullah e S Alam. Aging of silicone rubber-based composite insulators under multi-stressed conditions: an overview. *Materials Research Express*, 6(10):102003, 2019.
- [4] Kleber Franke Portella, Fernando Piazza, Paulo Cesar Inone, Sebastião Ribeiro Jr, Mário Seixas Cabussú, Dailton Pedreira Cerqueira e 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.
- [5] Bystrík Dolník, L’uboš Šárpataky, Iraida Kolcunová e Peter Havran. Sensing method using multiple quantities for diagnostic of insulators in different ambient conditions. *Sensors*, 22(4):1376, 2022.
- [6] 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.
- [7] JL Fierro-Chavez, I Ramirez-Vazquez e 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.

- [8] Benjamim Ferreira De Barros, Sonia Regina Pinheiro, Ricardo Luis Gedra, Reinaldo Borelli e Elaine Cristina de Almeida Guimarães. *NR-10-Guia Prático de Análise E Aplicação*. Saraiva Educação SA, 2010.
- [9] Thiago de Carvalho BATISTA et al. Transformadores de corrente com núcleo de liga nanocristalina utilizados para serviços de medição e proteção em sistemas elétricos. 2014.
- [10] Eduardo Fontana, S Campello Oliveira, F Jd Md M Cavalcanti, R Bandeira Lima, Joaquim F Martins-Filho e 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.
- [11] Isaias Ramirez-Vazquez e 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.
- [12] John G Webster. *The measurement, instrumentation and sensors handbook*, volume 14. CRC press, 1998.
- [13] Klaus Schon. *High impulse voltage and current measurement techniques*. Springer, 2013.
- [14] Benedito A Luciano, Raimundo CS Freire, José Gutembergue A Lira, Glauco Fontgalland e WB Castro. Transformador de corrente com núcleo toroidal de liga nanocristalina. *IEEE Latin American Transactions*, 4(3), 2006.
- [15] Y al Yoshizawa, S Oguma e K Yamauchi. New fe-based soft magnetic alloys composed of ultrafine grain structure. *Journal of applied Physics*, 64(10):6044–6046, 1988.
- [16] Benedito Antonio Luciano e Walman Benício Castro. 8. ligas nanocristalinas: histórico, desenvolvimento e aplicações eletroeletrônicas. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, 7(1), 2012.
- [17] MA Willard, DE Laughlin, ME McHenry, D Thoma, K Sickafus, Jo O Cross e VG Harris. Structure and magnetic properties of (fe 0.5 co 0.5) 88 zr 7 b 4 cu 1 nanocrystalline alloys. *Journal of Applied Physics*, 84(12):6773–6777, 1998.
- [18] Sb6 analog output leakage current sensor transducer da xiamen ztc technology co. ltd. <https://www.zntarsensor.com/leakage-current-transducer-sensor/555-b6-dc-leakage-current-sensor.html>
Acessado em: 15.11.2022.

- [19] Sb7 analog output leakage current sensor da *Xiamen ztc technology co. ltd.*
<https://www.zntarsensor.com/leakage-current-transducer-sensor/556-b7-dc-leakage-current-sensor.html>
 Acessado em: 15.11.2022.
- [20] Bj6 dc 35mm,45mm,55mm 72mm id leakage current sensor da *Xiamen ztc technology co. ltd.* <https://www.zntarsensor.com/leakage-current-transducer-sensor/811-bj6-dc-leakage-current-sensor.html>
 Acessado em: 15.11.2022.
- [21] N Bashir e 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.
- [22] Rodrigo J Villalobos, Luis A Moran, Fernando Huenupán, Francisco Vallejos, Roberto Moncada e Cristian Pesce. A new current transducer for on-line monitoring of leakage current on hv insulator strings. *IEEE Access*, 10:78818–78826, 2022.
- [23] Graziella Bedenik. Transformador diferencial variável rotativo (rvdt) de bobina plana, 2022. Orientador: Elyson Carvalho. 2022. 49 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Eletrônica, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão.