



Universidade Federal  
de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

SUELSON LOPES DE CARVALHO BATISTA

**SISTEMA DE MONITORAMENTO REMOTO DE  
PARA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO BASEADO NA  
MEDIÇÃO DA CORRENTE DE FUGA TOTAL**

Campina Grande, Paraíba  
Abril de 2017

SUELSON LOPES DE CARVALHO BATISTA

**SISTEMA DE MONITORAMENTO REMOTO DE  
PARA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO BASEADO NA  
MEDIÇÃO DA CORRENTE DE FUGA TOTAL**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Coordenação de Curso de Engenharia Elétrica  
da Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Proteção de Equipamentos Elétricos

Orientador: George Rossany Soares de Lira, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba

Abril de 2017

SUELSON LOPES DE CARVALHO BATISTA

# **SISTEMA DE MONITORAMENTO REMOTO DE PARA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO BASEADO NA MEDIÇÃO DA CORRENTE DE FUGA TOTAL**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Coordenação de Curso de Engenharia Elétrica  
da Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Proteção de Equipamentos Elétricos

Aprovado em:     /     /

---

**Professor Avaliador**  
Avaliador

---

**George Rossany Soares de Lira, D. Sc.**  
Orientador, UFCG

Campina Grande, Paraíba  
Abril de 2017

*A minha Mãe;  
a mais importante, extraordinária e bela flor que enfeita o jardim da minha existência.*

# AGRADECIMENTOS

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

Agradeço a mais bela das obras construída pelo ser supremo, a família. A minha guerreira e amorosa mãe Antonia Lopes da Silva Batista, ao meu pai Severino de Carvalho Batista e aos meus melhores amigos e companheiros, meus irmãos Severino de Carvalho Batista Júnior e Suhélio Lopes de Carvalho Batista.

Agradeço a todos os professores por me proporcionar o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional, em especial meus sinceros agradecimentos ao professor Pedro Luiz do Nascimento por ter me dado inúmeras oportunidades no ambiente acadêmico, ao professor José Gutemberg de Assis Lira pela sua maestria e sensibilidade que o diferenciou como educador transmitindo palavras motivadoras e inteligentes durante esse tempo de caminhada, além da sua disposição em sempre querer ajudar o próximo e pelo suporte técnico na realização deste trabalho.

Quero expressar o meu reconhecimento e admiração ao professor orientador George Rossany Soares de Lira, por ter compartilhado comigo suas ideias, conhecimentos e experiências ao longo da orientação.

Meus cordiais agradecimentos aos meus amigos de laboratório Vandilson Rodrigo do Nascimento Barbosa, Cícero Rômulo Campos de Amorim Filho e aos engenheiros Wellington Antônio Batista da Silva e Lenilson Andrade Barbosa pelas suas indiscutíveis e essenciais contribuições para este trabalho. Aos amigos de jornada Frank Wesley Rodrigues, Raoni de Araújo Pegado, Raymundo de Amorim Júnior e Zózimo Pereira Guedes, que sempre foram cruciais no processo de formação do conhecimento ao longo do curso.

Aos que fazem o Laboratório de Alta Tensão.

Meus sinceros agradecimentos a todos que de alguma forma doaram um pouco de si para que este sonho se tornasse possível.

*"O futuro pertence àqueles  
que acreditam na beleza  
dos seus sonhos."  
Eleanor Roosevelt*

# RESUMO

Os para-raios de óxido de zinco são dispositivos essenciais na proteção de equipamentos dos sistemas elétricos de potência. Eles contribuem para a elevação da confiabilidade, economia e continuidade de operação dos sistemas elétricos. Por estarem conectados entre a fase e a terra, haverá uma corrente de fuga da ordem de miliampères, quando submetidos à tensão de operação. A corrente de fuga é um indicador do nível de degradação dos para-raios; a maioria das técnicas de monitoramento de para-raios de óxido de zinco é baseada na decomposição da corrente de fuga, sendo esta composta por uma componente capacitiva e outra resistiva. No entanto, esse método apresenta limitações técnicas e práticas, dentre as quais é a necessidade de se obter uma amostra da tensão aplicada no para-raios, para realizar a decomposição da corrente. Neste trabalho é proposto um sistema de monitoramento remoto de para-raios de óxido de zinco baseado na medição e análise da corrente de fuga total, isentando-se da necessidade da medição da tensão aplicada no para-raios. O sistema de monitoramento é composto por módulos de aquisição, transmissão, processamento de dados e uma página *web*. A aquisição e transmissão são realizadas por um sistema embarcado localizado no condutor de aterramento do para-raios e o módulo de processamento em computador remoto. O sistema de transmissão é baseado no padrão *ZigBee*. A fim de estabelecer o monitoramento remoto, foi necessário fazer uso do conceito de computação nas nuvens e de um ambiente de desenvolvimento *web*, que conjugasse ferramentas necessárias para a criação de um *site* dinâmico utilizado como interface do sistema proposto. A utilização de uma interface gráfica permite o acompanhamento em tempo real do estado de degradação do para-raios, por meio da forma de onda da corrente de fuga total. Testes em laboratório estão sendo conduzidos e bons resultados foram alcançados até o momento.

**Palavras-chave:** Corrente de fuga total, monitoramento remoto, para-raios, rede de sensores.

# ABSTRACT

Metal-oxide surge arresters are essential devices in the protection of electrical power system equipment. They contribute to the elevation of reliability, economy and continuity of operation of electrical systems. Because they are connected between the phase and the earth, there will be a leakage current of the order of milliamperes, when subjected to the operating voltage. Leakage current is an indicator of the level of degradation of the surge arresters, most metal-oxide surge arresters monitoring techniques are based on the decomposition of the leakage current, which is composed of a capacitive component and Another resistive. However, this method presents technical and practical limitations, the main one of which is the need to obtain a sample of the voltage applied to the surge arrester to perform the current decomposition. In this work, a system of remote monitoring of metal-oxide surge arresters based on the measurement and analysis of the total leakage current is proposed, exempting itself from the need to measure the voltage applied to the surge arrester. The monitoring system consists of modules for acquisition, transmission, data processing and a web page. The acquisition and transmission are performed by an embedded system located on the earthing conductor of the surge arrester and the remote computer processing module. The transmission system is based on the ZigBee standard. In order to establish remote monitoring, it was necessary to make use of the concept of cloud computing and a development environment web, which combined the necessary tools to create a dynamic site used as interface of the proposed system. The use of a graphical interface allows the real-time monitoring of the degradation state of the surge arrester by means of the waveform of the total leakage current. Laboratory tests are being conducted and good results have been achieved so far.

**Keywords:** Total leakage current, remote monitoring, surge arrester, sensor network .

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estrutura de um para-raios de ZnO com invólucro de porcelana. . . . .	22
Figura 2 – Varistores de ZnO em diversas dimensões. . . . .	23
Figura 3 – Curva característica típica do para-raios de ZnO. . . . .	24
Figura 4 – Modelo elétrico de um para-raios de ZnO. . . . .	25
Figura 5 – Forma de onda da tensão e corrente operando na região de baixa corrente. . . . .	26
Figura 6 – Diagrama funcional do sensor de corrente de fuga. . . . .	31
Figura 7 – Circuito completo do sistema de transmissão/recepção. . . . .	32
Figura 8 – Diagrama de blocos do sistema de avaliação do nível de degradação de para-raios de ZnO. . . . .	33
Figura 9 – Diagrama de blocos do sistema de monitoramento da corrente de fuga total. . . . .	35
Figura 10 – Circuito elétrico para o gatilho do sinal $V\alpha I$ . . . . .	35
Figura 11 – Formas de onda do circuito comparador de tensão. . . . .	36
Figura 12 – Diagrama de blocos do sistema de monitoramento da corrente de fuga total. . . . .	39
Figura 13 – Diagrama Esquemático do Sistema de Monitoramento. . . . .	40
Figura 14 – Núcleo toroidal N3E3. . . . .	41
Figura 15 – Diagrama esquemático de um sensor indutivo. . . . .	41
Figura 16 – Diagrama do fluxo magnético. . . . .	42
Figura 17 – Diagrama esquemático da unidade de entrada. . . . .	43
Figura 18 – Circuito de um amplificador operacional elementar. . . . .	45
Figura 19 – Circuito de um filtro passivo passa-altas RC. . . . .	46
Figura 20 – Representação da fase e frequência do filtro. . . . .	47
Figura 21 – Diagrama esquemático da unidade de condicionamento. . . . .	48
Figura 22 – Fotografia das unidades de entrada e condicionamento. . . . .	48
Figura 23 – Fotografia da tela de cristal líquido. . . . .	49
Figura 24 – Diagrama esquemático da unidade de processamento. . . . .	50
Figura 25 – Fotografia da unidade de processamento. . . . .	50
Figura 26 – Fotografia do módulo de comunicação Xbee-pro baseado na tecnologia ZigBee. . . . .	52
Figura 27 – Diagrama de pinos e fotografia do CI MAX 232. . . . .	53
Figura 28 – Fonte de tensão simétrica CC. . . . .	53
Figura 29 – Fotografia da fonte de tensão simétrica CC. . . . .	54
Figura 30 – Fotografias das PCIs desenvolvidas. . . . .	55
Figura 31 – Desenvolvedor WAMP. . . . .	56

Figura 32 – (a) Página inicial. (b) Página de acesso. . . . .	57
Figura 33 – (a) Para-raios PR-01. (b) Para-raios PR-02. . . . .	57
Figura 34 – Pontos da corrente de fuga total em arquivo txt. . . . .	58
Figura 35 – Fotografia dos para-raios PR-01 e PR-02. . . . .	58
Figura 36 – Arranjo experimental utilizado para os ensaios. . . . .	59
Figura 37 – Fotografia do arranjo experimental utilizado para os ensaios. . . . .	60
Figura 38 – Diagrama elétrico do ensaio realizado. . . . .	62
Figura 39 – Resposta em amplitude e frequência do sensor de corrente. . . . .	62
Figura 40 – Formas de onda da tensão do sistema e correntes de fuga no para-raios PR-01. . . . .	63
Figura 41 – Formas de onda da tensão do sistema e correntes de fuga no para-raios PR-02. . . . .	64
Figura 42 – Fotografia do Suporte Metálico do Sistema de Monitoramento. . . . .	65
Figura 43 – Fotografia do Sistema de Monitoramento. . . . .	66
Figura 44 – Sensor de temperatura e umidade DHT 11. . . . .	73
Figura 45 – Diagrama de pinos e fotografia do PIC 18F452. . . . .	75
Figura 46 – Fotografia da confecção da PCI. . . . .	78
Figura 47 – Layout da PCI das unidades de entrada e condicionamento. . . . .	79
Figura 48 – Layout da PCI das unidade de processamento. . . . .	80
Figura 49 – Layout da PCI da fonte de alimentação. . . . .	80

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	Analógico/Digital.
AMPOP	Amplificador Operacional.
bps	<i>Bits</i> por segundo.
CC	Corrente Contínua.
CFT	Corrente de Fuga Total.
CI	Circuito Integrado.
CMRR	<i>Common Mode Rejection Ratio</i> (Relação de Rejeição em Modo Comum).
CPU	<i>Central Processing Unit</i> (Unidade de Processamento Central).
EEPROM	<i>Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory</i> (Memória Apenas de Leitura Programável e Apagável Eletricamente).
FM	<i>Frequency Modulation</i> (Modulação em Frequência).
GND	<i>Ground</i> (Terra).
HTML	<i>HyperText Markup Language</i> (Linguagem de Marcação de Hipertexto).
I/O	<i>Input/Output</i> (Entrada/Saída).
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> (Comissão Eletrotécnica Internacional).
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos).
INA	<i>Instrumentation Amplifier</i> (Amplificador de Instrumentação).
LAT	Laboratório de Alta Tensão.
LCD	<i>Liquid-Crystal Display</i> (Tela de Cristal Líquido).
LCM	<i>Leakage Current Monitor</i> (Monitor de Corrente de Fuga).
LEASE	Laboratório de Eletrônica Aplicada a Sistemas Elétricos.
MCOV	<i>Maximum Continuous Operating Voltage</i> (Máxima Tensão de Operação Contínua).

MIPS	Milhões de Instruções por Segundo.
PCI	Placa de Circuito Impresso.
PHP	<i>Hypertext Preprocesso</i> (Pré-processador de Hipertexto).
PIC	<i>Programmable Interface Controller</i> (Controlador de Interface Programável).
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso).
RAM	<i>Random Access Memory</i> (Memória de Acesso Aleatório).
ROM	<i>Read only memory</i> (Memória Somente de Leitura).
SEP	Sistema Elétrico de Potência.
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i> (Relação Sinal Ruído).
SQL	<i>Structured Query Language</i> (Linguagem de Consulta Estruturada).
SSE	<i>Sum of Squares Due to Error</i> (Soma dos Erros Quadráticos).
SST	<i>Total Sum of Squares</i> (Soma Total dos Desvios com Relação à Média).
TC	Transformador de Corrente.
TP	Transformador de Potencial.
TPC	Transformador de Potencial Capacitivo.
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande.
USART	<i>Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter</i> (Transmissor/Receptor Universal e Assíncrono).
WAMP	Windows, Apache, MySQL, PHP.
ZnO	Óxido de Zinco.

# LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Ampère
$\alpha$	Proporção
$cm^2$	Área
$C$	Capacitor
$I$	Corrente
$D$	Diodo
$^{\circ}$	Grau
$Hz$	Hertz
$m$	Metro
$\mu$	Micro
$\Omega$	Ohm
$\mu r$	Permeabilidade magnética relativa
$pF$	PicoFarad
$R$	Resistor
$V$	Volt(Tensão Elétrica)
$XC$	Reatância Capacitiva

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
1.1	Motivação	17
1.2	Objetivos	19
1.3	Organização do Trabalho	20
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>21</b>
2.1	Para-raios de Óxido de Zinco	21
2.2	Aspectos Construtivos do Para-raios de ZnO	21
2.3	Varistores de Óxido de Zinco	22
2.4	Características Elétricas	23
2.4.1	Principais Parâmetros	24
2.4.2	Corrente de Fuga Total	24
2.4.2.1	Componente Capacitiva da Corrente de Fuga Total	26
2.4.2.2	Componente Resistiva da Corrente de Fuga Total	26
2.5	Procedimentos de Medição da Corrente de Fuga	27
2.6	Monitoramento dos Para-raios	28
2.6.1	Estados de Operação dos Para-raios	28
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>30</b>
3.1	Sistema de Monitoramento Sem Fio Proposto por Lira (2007)	30
3.2	Sistema de Monitoramento Sem Fio Proposto por Macêdo (2010)	33
3.3	Sistema de Monitoramento Sem Fio Proposto por Brito (2013)	34
3.4	Discussões Gerais Sobre os Sistemas de Monitoramento	37
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>39</b>
4.1	Unidade de Entrada	40
4.1.1	Obtenção do Sinal da Corrente de Fuga Total	40
4.1.2	Obtenção do Valor da Temperatura Ambiente e Umidade	44
4.2	Unidade de Condicionamento	44
4.3	Unidade de Processamento	49
4.4	Unidade de Transmissão e Recepção	51
4.4.1	Comunicação RS 232	52
4.5	Fonte de Alimentação CC	53
4.6	Interface Gráfica	55
4.7	Ensaios e Medições	58
4.7.1	Amostras Ensaeadas	60

5	RESULTADOS E ANÁLISES . . . . .	61
5.1	Resposta em Frequência do Sistema de Monitoramento . . . . .	61
5.2	Sistema de Monitoramento da Corrente de Fuga Total . . . . .	63
5.3	Protótipo do Sistema de Monitoramento . . . . .	65
6	CONCLUSÃO . . . . .	67
	REFERÊNCIAS . . . . .	68
	<b>ANEXOS</b>	<b>72</b>
	ANEXO A – SENSOR DHT 11 . . . . .	73
B	– MICROCONTROLADOR PIC . . . . .	74
	<b>APÊNDICES</b>	<b>76</b>
	APÊNDICE A – CONFECÇÃO DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO	77
	APÊNDICE B – <i>LAYOUT</i> DAS PCIS . . . . .	79
B.1	PCI das Unidades de Entrada e Condicionamento . . . . .	79
B.2	PCI da Unidade de Processamento . . . . .	80
B.3	PCI da Fonte de Alimentação Simétrica CC . . . . .	80
	APÊNDICE C – TRABALHOS PUBLICADOS . . . . .	81

# 1 INTRODUÇÃO

As empresas do setor elétrico necessitam de informações mais confiáveis sobre o desempenho elétrico de seus equipamentos, visando uma maior eficácia na operação dos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Uma das principais maneiras para obter essas informações é por meio do monitoramento remoto de equipamentos em linha, objetivando uma manutenção preventiva e preditiva (BATISTA, 2015).

Em meados de 1970 surgiram os primeiros para-raios de óxido de zinco (ZnO), os quais passaram a ser utilizados nos Sistemas Elétricos de Potência (SEP). Eles vêm sendo empregados há mais de 30 anos com o intuito de aumentar a confiabilidade do sistema elétrico. Apesar do seu baixo custo, quando comparado a outros equipamentos de uma subestação, o para-raios apresenta uma importância fundamental, visto que ele é responsável pela proteção dos equipamentos de grande porte, por exemplo, os transformadores de potência, reatores, banco de capacitores, garantindo assim uma maior confiabilidade do sistema elétrico (COSTA, 1999).

De acordo com Lira (2007), o para-raios ZnO, em sua operação normal, é exposto a diferentes tipos de estresses, tais como as sobretensões devido as comutações, as sobretensões derivadas das descargas atmosféricas e a poluição externa. Todos estes fatores podem causar a elevação da corrente de fuga, e esse aumento pode ultrapassar o limite crítico, causando falhas no equipamento, existindo até o risco de explosão e conseqüentemente, danos aos equipamentos e transeuntes, além de prejudicar o fornecimento de energia elétrica.

Idealmente, os para-raios devem se comportar como um isolador para valores de tensão menor ou igual à tensão de operação do sistema e se comportar como um bom condutor quando ocorrer surtos na linha de transmissão, limitando, assim, o nível de tensão a valores suportados pelos equipamentos da subestação.

## 1.1 Motivação

As empresas de energia elétrica necessitam reduzir os custos associados à manutenção dos seus equipamentos instalados. Uma das principais maneiras de conseguir esta redução é o monitoramento remoto de equipamentos conectados na rede elétrica, objetivando a migração da manutenção corretiva para a preventiva e a preditiva, uma vez que a manutenção preditiva só pode ser realizada em dispositivos que permitem a existência de acompanhamento.

É possível encontrar na literatura várias técnicas utilizadas para o monitoramento de para-raios de ZnO. Podendo ser *on-line*, as que não necessitam de realizar a desconexão do para-raios do sistema elétrico, sendo empregada em campo. Já as técnicas *off-line* requerem a retirada do para-raios de serviço, para os submeterem a ensaio em ambientes controlados, como laboratórios.

Essas técnicas são divididas ainda segundo seu princípio de funcionamento, ou seja, como elas identificam o estado de degradação do para-raios (IEC-60009-5, 2000); (HEINRICH; HINRICHSEN, 2001). Dessa forma, existem técnicas fundamentadas na medição da temperatura externa, utilizando principalmente o termovisor, que por sua vez é capaz de produzir uma imagem destacando o perfil térmico do para-raios, possibilitando a detecção de qualquer aquecimento anormal, fora do padrão térmico. O monitoramento e diagnóstico por termografia se mostra bastante consistente, segundo as concessionárias de energia elétrica. Suas principais vantagens consistem em serem técnicas não invasivas, não destrutivas e realizadas à distância (LIRA, 2012). Contudo, esta técnica possui alguns inconvenientes, um deles está relacionado ao fato de que a temperatura externa do para-raios nem sempre corresponde aos níveis de temperatura nos blocos de ZnO. Além do mais, esta técnica deve ser aplicada no período noturno para evitar interferências da luz solar, não havendo a possibilidade de se realizar o monitoramento em tempo real do para-raios.

O método da medição da curva  $V \times I$  (*off-line*), realiza o levantamento da curva  $V \times I$  do para-raios para tensões entre 50% da sua Máxima Tensão de Operação Contínua (MCOV) e a tensão de referência (IEC-60009-5, 2000); (HEINRICH; HINRICHSEN, 2001). Considerado um dos métodos mais confiáveis, já que todos os mecanismos de falhas em para-raios de ZnO provocam alterações na sua curva característica, de modo a comparação entre curvas podem ser usadas para indicar a degradação do para-raios. A principal e grande desvantagem desse método é a limitação para ser aplicado em ambientes controlados, fazendo uso de fontes de alta tensão e sistemas de medição de elevado valor financeiro, inviabilizando o procedimento de monitoramento.

Na medição de descargas parciais (*off-line*), o para-raios é energizado durante 2 a 10 s com tensão nominal e, em seguida, a tensão aplicada é reduzida para 1,05 vezes a MCOV, caso os níveis de descargas parciais sejam maiores que 10 pC, o para-raios

é considerado defeituoso (IEC-60099-4, 2001). Assim como o método de levantamento da curva  $V X I$ , a medição de descargas parciais em para-raios de ZnO necessita que o equipamento seja removido do sistema. Estudos recentes estão sendo desenvolvidos para realizar medições *on-line*, como os sinais são de baixa intensidade e de alta frequência sobrepostos pelo ruído ambiente, impossibilita a discriminação dessa técnica (BACEGA et al., 2009); (BACEGA; TATIZAWA; KANASHIRO, 2009).

Outra técnica bastante empregada para o monitoramento de para-raios de ZnO, é baseada na medição da corrente de fuga que percorre o para-raios em direção a conexão terra, a qual é bastante sensível ao nível de degradação do para-raios (CARLSON; GUPTA; SWEETANA, 1986). A principal vantagem dessa técnica de monitoramento é a possibilidade de medição direta de uma grandeza elétrica do equipamento sem a necessidade de retirá-lo de operação.

Inserido nessa linha de pesquisa, este trabalho foi desenvolvido a partir da necessidade das empresas do setor elétrico de monitorar em tempo real a corrente de fuga do para-raios de ZnO remotamente, *on-line* e continuamente, visando à análise das condições reais de funcionamento do equipamento. Para atender essa necessidade foi desenvolvido um sistema de monitoramento remoto de para-raios de ZnO baseado na medição da Corrente de Fuga Total (CFT), de fácil operação que pode ser usado em rede de alta tensão. O sistema ainda é capaz de operar a distância, sem qualquer necessidade de ajustes ou calibração periódica. E assim, permite o acompanhamento via interface gráfica e armazenamento da forma de onda da CFT do para-raios. Sua operação visa aumentar a exatidão, a eficiência e a confiabilidade no monitoramento dos para-raios e conseqüentemente a confiabilidade do sistema elétrico.

Para obtenção de informações concernentes aos procedimentos de monitoramento e diagnóstico de para-raios de ZnO, utilizou-se artigos, periódicos, dissertações, teses e normas.

## 1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um sistema de monitoramento remoto em para-raios de ZnO baseado na medição da corrente de fuga total que possibilite registrar a forma de onda da corrente de para-raios em operação, e enviá-la à sala de comando da subestação por meio de uma rede de comunicação sem fio. Em seguida os dados são hospedados em uma página *web*.

São objetivos específicos, o desenvolvimento de:

- Uma Unidade de Aquisição e Condicionamento de sinais de corrente de fuga total. Realizam-se os ajustes necessários (aquisição, retificação e integração), nos sinais de corrente para que eles possam ser processados.
- A unidade processamento tem como atribuições principais coordenar a leitura, digitalização e armazenamento.
- A unidade de transmissão é responsável por enviar os dados a uma sala de controle.
- A unidade de recepção possui a finalidade de receber os dados enviados através da rede de sensores sem fio.
- Uma aplicação *Web* que permite monitorar os para-raios.

## 1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado em seis capítulos.

No Capítulo 2, apresenta-se uma fundamentação teórica sobre as características elétricas do para-raios ZnO. No Capítulo 3 é abordada uma revisão bibliográfica de trabalhos que utilizaram métodos de monitoramento da corrente de fuga do para-raios ZnO, bem como suas vantagens e desvantagens em relação a cada sistema. No Capítulo 4 são descritos a metodologia utilizada no desenvolvimento e validação do sistema de monitoramento remoto em para-raios de ZnO baseado na medição da CFT. Inicialmente, são apresentadas as partes constituintes do sistema proposto, sendo explicitadas suas principais características e funções no sistema. Em seguida, são descritos os ensaios utilizados para validação do sistema de monitoramento, bem como o ambiente controlado utilizado (Laboratório de Alta Tensão). No Capítulo 5 são relatados os ensaios conduzidos para validação e análises dos resultados. Para finalizar, o Capítulo 6 é dedicado para considerações finais e contribuições do trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo é realizada uma breve fundamentação teórica sobre os para-raios de ZnO e suas principais características.

### 2.1 Para-raios de Óxido de Zinco

Os para-raios de ZnO são dispositivos essenciais na proteção de equipamentos do sistema elétrico contra sobretensões de descargas atmosféricas e de manobras, fenômenos estes de origem externa e interna, respectivamente. A função do para-raios é limitar as sobretensões citadas a níveis que possam ser suportados pelos isolamentos elétricos dos equipamentos, tais como os transformadores de potência.

Nos sistemas elétricos os para-raios de ZnO são normalmente instalados entre a linha e o terra. O para-raios possui curva característica  $V \times I$  altamente não linear entre tensão e corrente, de modo que uma pequena corrente de fuga, na ordem de miliampères, circula continuamente pelos elementos não lineares, varistores, quando em regime normal de operação. Devido à alta capacidade de absorção de energia e característica  $V \times I$  não linear, a corrente de fuga que era da ordem de miliampères pode chegar a quiloampères durante a passagem de uma descarga elétrica, e cessada a descarga o para-raios deve voltar a operar normalmente.

### 2.2 Aspectos Construtivos do Para-raios de ZnO

Basicamente, os para-raios de ZnO são construídos por blocos de varistores de ZnO (resistores não lineares) empilhados e revestidos por um invólucro, que pode ser porcelana ou material polimérico que assegura a estanqueidade do equipamento, evitando o contato dos varistores com poluentes e umidade. O contato pode reduzir a vida útil do para-raios, além de ter seu funcionamento comprometido (URSINE, 2013). Ademais, os para-raios de ZnO possuem outros elementos construtivos, os quais são apresentados na Figura 1.

Figura 1 – Estrutura de um para-raios de ZnO com invólucro de porcelana.

Figura 2 – Varistores de ZnO em diversas dimensões.



1

Fonte: (hisupplier.com, 2017).

## 2.4 Características Elétricas

A principal característica elétrica do para-raios de ZnO é a sua alta não linearidade entre a tensão e corrente (curva  $V \times I$ ). O para-raios de ZnO permite uma conexão direta com o sistema elétrico gerando apenas uma corrente de fuga desprezível em condições normais de operação (BRITO, 2013a).

O para-raios pode atuar em três regiões distintas: baixa corrente, alta não linearidade e alta corrente ou superior. Em regime normal de operação a corrente de fuga do para-raios encontra-se na região de baixa corrente.

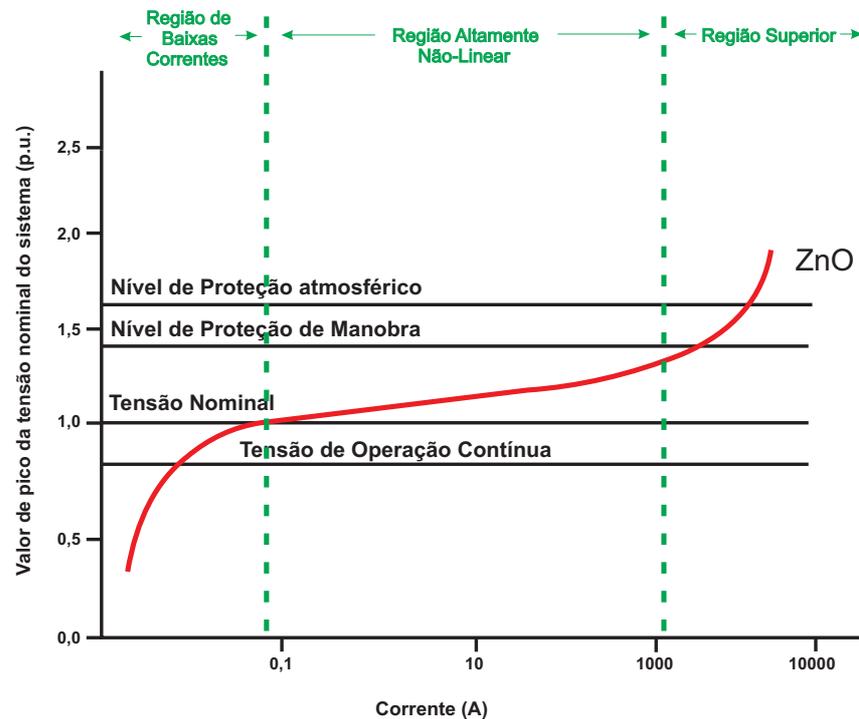
A região de baixa corrente (ou região de pré-ruptura) caracteriza-se por uma relação próxima à linear, apresentando grande dependência da temperatura. As propriedades dessa região são ditadas pelo contorno dos grãos de ZnO e ela é limitada pela tensão nominal do varistor. Quando na região de baixa corrente, o para-raios se encontra em regime permanente e com tensão de operação entre 70% e 80% da nominal.

A região de não linearidade ou região de ruptura compreende densidades de corrente da ordem de 100 a 1000 A/cm<sup>2</sup>, apresentando pequena variação de tensão para um grande aumento na corrente (medida por impulsos de corrente representando surtos atmosféricos e de manobra). O limite superior desta região representa a corrente nominal do para-raios e a queda de tensão no dispositivo quando percorrido por esta corrente (URSINE, 2013).

A região de alta corrente apresenta relação linear entre a tensão e a corrente. Nesta região, o aumento de tensão é ditado pela impedância dos grãos de ZnO. Ainda, caso o dispositivo permaneça muito tempo com elevada corrente fluindo por seus terminais, pode ocorrer uma avalanche térmica (processo contínuo de elevação da temperatura) ou alteração de suas características de proteção, podendo causar a destruição do para-raios (LIRA, 2012). A Figura 3 mostra a curva característica típica do para-raios de ZnO.

<sup>1</sup> Disponível em: <<http://www.hisupplier.com/a-varistor/>>

Figura 3 – Curva característica típica do para-raios de ZnO.



Fonte: Adaptada de (ABB, 1995).

### 2.4.1 Principais Parâmetros

Os critérios de seleção e os principais parâmetros de um para-raios de ZnO são, tensão nominal, tensão máxima de operação contínua e capacidade de absorção de energia, os quais estão descritos em [IEC-60009-5 \(2000\)](#) e [FRANCO \(2001\)](#). Tais parâmetros são resumidos a seguir.

- **Tensão Nominal:** Máximo valor eficaz de tensão temporária permitida entre os terminais do para-raios para que ele continue funcionando de acordo com suas características de projeto, sem conduzir a um processo de avalanche térmica.
- **Tensão Máxima de Operação Contínua:** Maior valor eficaz de tensão à frequência industrial admissível que um para-raios é projetado para operar continuamente.
- **Capacidade de Absorção de Energia:** Quantidade de energia que um para-raios é capaz de absorver e dissipar durante um surto sem alteração de suas características de projeto.

### 2.4.2 Corrente de Fuga Total

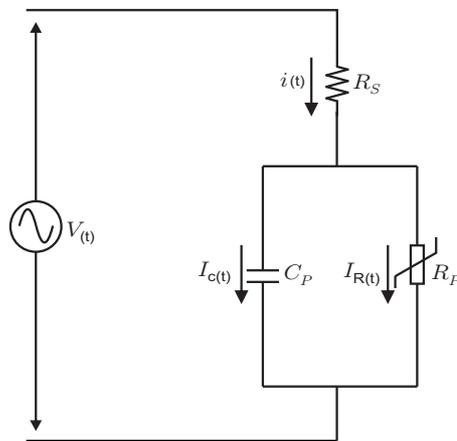
Uma vez que são usualmente conectados entre a fase e o terra, os para-raios de ZnO apresentam uma corrente que flui continuamente entre seus terminais mesmo em

condições normais de operação. Essa corrente é chamada de corrente de fuga e seu valor pode variar de microampères até miliampères, quando submetidos à tensão de operação.

É possível representar eletricamente os para-raios com auxílio de modelos. [Haddad et al. \(1990\)](#) apresentam e comentam os vários modelos elétricos de para-raios. Eles afirmam que uma representação confiável e simples pode ser obtida com o modelo apresentado na Figura 4 .

No modelo,  $R_s$  caracteriza a resistência dos grãos de ZnO,  $R_p$  representa a resistência não-linear da região intergranular e  $C_p$  consiste na capacitância formada pelos grãos de ZnO.

Figura 4 – Modelo elétrico de um para-raios de ZnO.



Fonte: (ENDO *et al.*, 1998).

Normalmente, convencionou-se que, a CFT do para-raios é composta por uma componente resistiva e outra capacitiva ([LIRA, 2012](#)).

$$i(t) = i_c(t) + i_r(t) \quad (2.1)$$

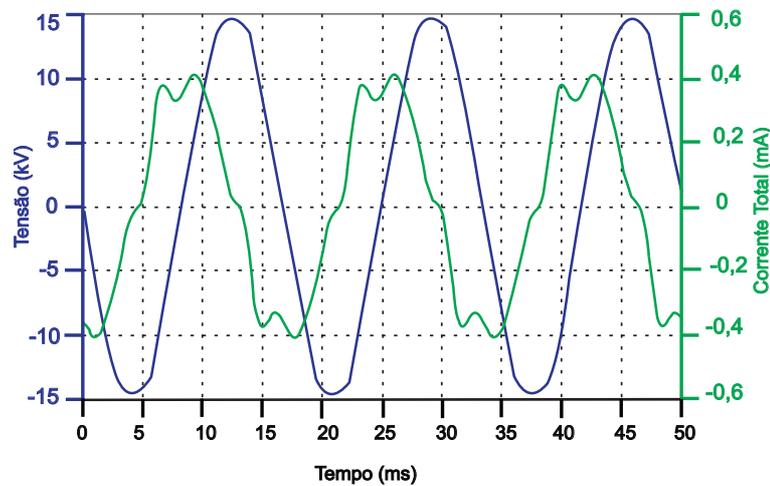
em que:

$$i_c(t) = c \frac{dv(t)}{dt}, \quad (2.2)$$

sendo  $v(t)$  a tensão aplicada ao para-raios.

É possível observar com o auxílio da Figura 5 uma forma de onda típica da corrente de fuga medida em laboratório, em um para-raios de distribuição, tensão nominal de 12 kV<sub>RMS</sub>, quando energizado a uma tensão de 10,2 kV<sub>RMS</sub>.

Figura 5 – Forma de onda da tensão e corrente operando na região de baixa corrente.



Fonte: (BRITO, 2013b).

Na região de baixa corrente, a corrente é composta por uma componente capacitiva e outra resistiva, sendo a componente capacitiva predominante. Para um para-raios em bom estado, a componente resistiva da corrente de fuga representa cerca de 5% a 20% da componente capacitiva (IEC-60009-5, 2000). O para-raios opera nesta região durante praticamente toda sua vida útil (estimada em 30 anos).

#### 2.4.2.1 Componente Capacitiva da Corrente de Fuga Total

A corrente capacitiva é causada pela permissividade dos grãos de ZnO e capacitâncias parasitas. Para tensão de operação, seu valor de pico varia entre 0,2 mA e 3 mA, dependendo dos parâmetros do para-raios utilizado. Tipicamente, o valor da capacitância de um para-raios está dentro da faixa entre 60 pF.kV/cm<sup>2</sup> e 150 pF.kV/cm<sup>2</sup> (IEC-60009-5, 2000).

#### 2.4.2.2 Componente Resistiva da Corrente de Fuga Total

A componente resistiva da corrente de fuga é produzida pelas mudanças na barreira de potencial formada na região intergranular dos varistores, esta barreira muda de acordo com a intensidade do campo elétrico aplicado, causando as distorções harmônicas captadas pelos instrumentos de medição. O crescimento da componente resistiva de 3ª ordem está diretamente ligada ao envelhecimento dos varistores de ZnO, sendo extremamente sensível ao seu grau de degradação, dessa forma, seu estudo é fundamental para monitoramento e diagnóstico do estado dos varistores (ZHU; RAGHUVVEER, 1999); (KIL et al., 2003); (LINDE; SWIFT, 1999).

## 2.5 Procedimentos de Medição da Corrente de Fuga

A deterioração das propriedades isolantes de um para-raios causa um incremento na corrente de fuga resistiva ou na perda de potência para os mesmos valores de tensão e temperatura. A maioria dos métodos utilizados para determinar o estado do para-raios baseia-se em medições de corrente de fuga. Os procedimentos de medições podem ser divididos em dois grupos: medições *on-line*, quando o para-raios está ligado ao sistema e energizado em condições normais de operação, e medições *off-line*, quando o para-raios é desconectado do sistema e energizado com uma fonte de tensão em outro local ou em laboratório. Utilizando os métodos *off-line* pode-se obter uma boa exatidão nas medições. Porém, apresenta como desvantagens o custo do equipamento de medição e a necessidade de retirar o para-raios do sistema. O método mais utilizado são aquelas medições realizadas de forma *on-line*.

A corrente de fuga que percorre o para-raios quando instalado em campo deve ser medida na conexão do para-raios ao cabo de aterramento. Isso se faz necessário porque circulações de correntes causadas por induções eletromagnéticas podem interferir na medição da corrente de fuga. Zanotti (2009) comprovou através de ensaios em laboratório e em medições em campo, que quando as correntes eram medidas na treliça da base que sustenta o para-raios, os resultados das correntes eram muito diferentes daquelas medidas no cabo de conexão entre o para-raios e o contador de descarga. Através dos testes realizados em laboratório concluiu-se que a corrente medida na treliça era devido a induções eletromagnéticas geradas na subestação.

Medições *on-line* de corrente são geralmente realizadas utilizando instrumentos portáteis ou instalados permanentemente. Os instrumentos portáteis são normalmente ligados ao cabo de aterramento do para-raios por meio de pinças amperimétricas. Os instalados permanentemente são conectados através de transformadores de corrente. O monitoramento da corrente de fuga de forma contínua é uma forma segura de acompanhar o estado de degradação do para-raios. As medições isoladas podem apontar para diagnósticos errados. Medições remotas podem ser implementadas utilizando um sistema informatizado para supervisão de equipamentos da subestação (BRITO, 2013b).

## 2.6 Monitoramento dos Para-raios

Os para-raios de ZnO têm um papel de grande importância no sistema elétrico, pois permitem o aumento da confiabilidade de funcionamento do sistema. As empresas concessionárias de energia elétrica possuem como prioridade a não interrupção do fornecimento, já que muitas vezes, a descontinuidade de abastecimento gera o pagamento de multas elevadas.

Como a utilização de para-raios de ZnO tem sido cada vez mais frequente em sistemas de alta e extra alta tensões, as empresas concessionárias de energia, instituições de pesquisa e fabricantes têm se preocupado e intensificado os estudos para aprimoramento de técnicas de manutenção preditiva que avaliam o desempenho destes para-raios em serviço, tendo conseqüentemente um aumento da confiabilidade de fornecimento e a diminuição dos custos de manutenção.

Por se tratar de um equipamento que não apresenta sinais visíveis de degradação ou do funcionamento incorreto, e que como os primeiros equipamentos foram instalados há aproximadamente 30 anos, sabe-se que o fim da vida útil da primeira geração de para-raios de ZnO vem se aproximando. Tem-se que o monitoramento contínuo dos para-raios de ZnO é de grande importância para se avaliar o seu nível de degradação e determinar o melhor momento para a retirada dos equipamentos não funcionais (MACÊDO, 2010).

Foi observado também que a CFT comporta-se de maneira diferente para os diferentes tipos de defeitos de para-raios, e assim é possível, utilizando a CFT, diagnosticar o para-raios quanto à existência ou não de defeito, e caso esteja defeituoso, qual o tipo de defeito característico (FERNANDO, 2001). Com base na literatura estudada, faz-se necessário elaborar um sistema de monitoramento da CFT, que possibilite enviar o sinal com a forma de onda da corrente de fuga do para-raios, por uma rede de comunicação sem fio até a sala de comando da subestação. Com isso, permite-se o armazenamento das formas de onda da corrente de fuga dos para-raios instalados em campo por um longo período de tempo. Com o armazenamento da corrente de fuga, pode-se construir um banco de dados sobre o comportamento da corrente de fuga do para-raios ao longo do tempo e aplicar técnicas de monitoramento e diagnóstico mais eficientes e diversificadas.

### 2.6.1 Estados de Operação dos Para-raios

Os para-raios são equipamentos que devem ser confiáveis tanto em condições normais de operação quanto em condições de surto. Pode-se verificar que as falhas nos para-raios são ocasionadas principalmente por:

**Perda de estanqueidade:** Segundo Wanderley Neto (2007), a perda da estanqueidade é caracterizada pela perda do isolamento físico entre o meio ambiente e o meio interno do para-raios, possibilitando a troca de gases entre eles, além de permitir a entrada

de umidade e poluição.

**Entrada de umidade:** A entrada de umidade pode decorrer de duas causas principais. A primeira consiste no processo de fabricação, resultado de alguma falha ocorrida durante o fechamento. A outra seria a perda da estanqueidade. O principal problema causado pela umidade é a ocorrência de descargas parciais, causadas pela formação de vapor de água no meio interno.

**Poluição superficial:** Pode provocar o surgimento de bandas secas na superfície da porcelana. As bandas secas geram descargas superficiais na porcelana alterando o campo elétrico na região e provocando o aquecimento dos varistores. A presença de poluição nos para-raios é uma das causas mais comuns de falhas ou aquecimento excessivo.

**Degradação dos varistores:** Pode ser resultado do seu envelhecimento natural, do seu envelhecimento precoce (motivado por esforços eletrotérmicos excessivos) ou mesmo da sua fratura. A degradação precoce dos varistores é um fator que pode contribuir para que um para-raios entre em processo de avalanche térmica e o conseqüente dano permanente do equipamento, através de fraturas ou carbonização dos varistores.

**Desalinhamento da coluna ativa:** Na maior parte das vezes, o desalinhamento da coluna de varistores se dá pelo transporte e armazenamento inadequado do equipamento, mas pode ser decorrente de uma falha na montagem do para-raios. O desalinhamento provoca o surgimento de caminhos condutivos preferenciais nas regiões de maior contato entre os blocos de varistores internos, de forma que há um sobreaquecimento nessas regiões provocando seu desgaste prematuro.

**Distribuição irregular da tensão:** Decorre de falhas de projeto ou de poluição superficial nos para-raios. A distribuição não uniforme provoca concentrações de campo elétrico nas regiões poluídas ou mais próximas do condutor energizado, levando a degradação prematura dos varistores (LIRA; BRITO; COSTA, 2013).

Para um estudo mais detalhado das características intrínsecas e do comportamento dos varistores e para-raios a base de ZnO, sugere-se o estudo dos seguintes trabalhos: (COSTA, 1999); (WANDERLEY NETO, 2007); (LIRA, 2007), assim como os artigos de (LEVINSON; PHILIPP, 1975); (GUPTA, 1990); (HEINRICH; HINRICHSEN, 2001).

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Mesmo existindo atualmente diversos sistemas desenvolvidos para o monitoramento de para-raios, não existe ainda um consenso em relação a melhor técnica de monitoramento a ser aplicada, cada uma apresentando vantagens e desvantagens.

Dentre as diversas técnicas existentes, neste capítulo, serão apresentadas as baseadas na medição da corrente de fuga que circula nos para-raios de ZnO. A aquisição da CFT baseia-se na medição da corrente que percorre o cabo de conexão do para-raios (terra), passando pelo equipamento e escoando para a malha de terra da subestação. A seguir, apresentam-se os principais métodos e técnicas utilizadas para a medição e análise da corrente de fuga.

### 3.1 Sistema de Monitoramento Sem Fio Proposto por Lira (2007)

Lira (2007) sugere o desenvolvimento de um instrumento, com um sensor não invasivo associado, capaz de monitorar, armazenar, analisar e transmitir regularmente sinais de corrente de fuga do para-raios.

De maneira geral, o sistema de monitoramento deve permitir o controle das condições de degradação dos para-raios, em subestações e linhas de transmissão, a fim de atender a padrões de operação pelo órgão regulador.

Para o monitoramento do para-raios impõe-se a necessidade de usar um sensor com sensibilidade adequada, pois a sua componente da corrente de fuga resistiva tem um valor relativamente baixo (da ordem de dezenas ou centenas de microampères). Assim, novos materiais foram estudados visando a construção de um sensor com sensibilidade e linearidade capaz de fazer parte de um sistema de aquisição da corrente de fuga. Após estudos comparativos de diversos materiais magnéticos optou-se por aqueles com a tecnologia nanocristalina. Sua principal característica é a superioridade magnética quando comparados com os materiais magnéticos convencionais. Assim, utilizou-se um núcleo toroidal de liga nanocristalina à base de FeSiBNbCu, fabricado pela MECAGIS<sup>®</sup>, e denominada de N3E3, para ser usado como sensor de corrente. Dentre as características avaliadas, destacam-se a elevada permeabilidade ( $\mu r$ ), para ser sensível a baixas correntes; a baixa coercividade, para ser facilmente magnetizável e desmagnetizável quando submetido a um fluxo magnético variante no tempo; a alta linearidade, para garantir a mesma relação de transformação e uma larga faixa de frequência, tendo em vista que a CFT do para-raios de ZnO e composta por significativas componentes harmônicas.

Para o armazenamento dos sinais da corrente de fuga, procurou-se agregar um sistema de medição, usando um microcontrolador com conversor Analógico/Digital (A/D) interno. Os valores amostrados e digitalizados são gravados de forma a permitir observação do comportamento e da evolução da corrente de fuga ao longo do tempo.

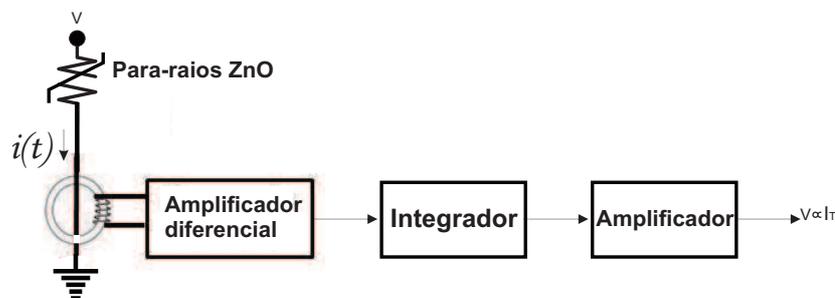
No processo de análise, os valores adquiridos são comparados com os valores padrões de operação para verificação se estão dentro da faixa de valores admitidos como normais para a funcionalidade do para-raios.

A transmissão dos sinais da corrente de fuga foi realizada via rádio frequência. Fazendo uso de uma técnica de dupla modulação a fim de preservar a informação contida na fase do sinal.

O sensor de corrente proposto por Lira (2007) é composto por núcleo toroidal com 26 espiras, um amplificador diferencial e um integrador passivo em que é conectado mais um estágio de amplificação, conforme mostrado a Figura 6.

O princípio básico do sensor de corrente magnético desenvolvido para medição da corrente de fuga no para-raios de ZnO, baseia-se na obtenção de uma tensão proporcional a intensidade da corrente que deseja medir. Para tal, faz-se a captação da intensidade do campo magnético  $H$  induzida em torno do cabo terra pela corrente de fuga  $i(t)$  e, com o condicionamento e processamento de sinais, extrai-se as informações de interesse.

Figura 6 – Diagrama funcional do sensor de corrente de fuga.

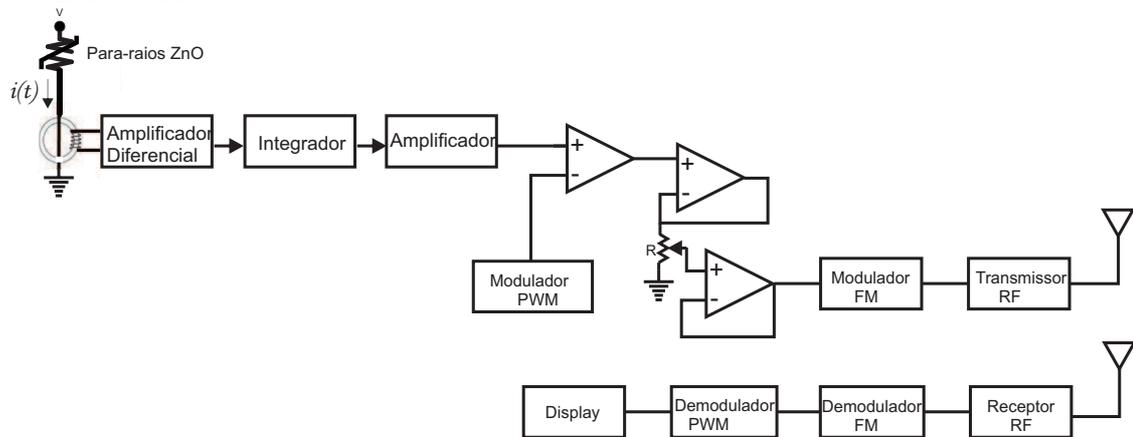


Fonte: (LIRA, 2007).

O sinal da corrente de fuga obtido na saída do sensor de corrente foi aplicado a um conjunto de circuitos contendo um microcontrolador e memória digital. A memória foi usada para armazenar as amostras da corrente de fuga  $i_t[n]$  e da tensão  $V[n]$  aplicada ao para-raios. A forma de onda da tensão em uma subestação de alta tensão pode ser obtida a partir de um transformador de potencial (TP). Os sinais digitalizados da tensão e CFT foram utilizados para determinar a diferença de fase entre a tensão e CFT, e assim, aplicando o método da diferença de fase, determinou-se a componente resistiva da corrente de fuga. Para tanto, foi projetado e montado um sistema composto por

um gravador digital para a aquisição das amostras da corrente de fuga e da tensão utilizando-se um microcontrolador PIC 18F452 com as rotinas para o processamento digital dos sinais embutidas. Na Figura 7 é apresentado o diagrama de blocos do sistema de transmissão/recepção completo, desenvolvido por Lira (2007). O sinal da CFT é modulado em PWM, operando com portadora em 2500 Hz, antes de submetê-lo a modulação em FM com portadora de 112 MHz. Esse procedimento visa assegurar uma forma de imunidade mais robusta da transmissão da informação desejada preservando-se contra erro de fase.

Figura 7 – Circuito completo do sistema de transmissão/recepção.



Fonte: (LIRA, 2007).

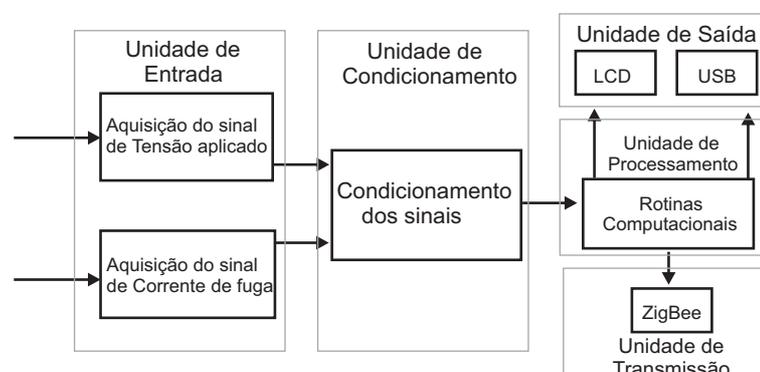
## 3.2 Sistema de Monitoramento Sem Fio Proposto por Macêdo (2010)

Assim como Lira (2007), Macêdo (2010) propõe um sistema de monitoramento da corrente de fuga em para-raios de ZnO, porém com algumas modificações e aperfeiçoamento, são eles:

- Uso de acopladores ópticos para isolar eletricamente o sinal da tensão proveniente do transformador de potencial capacitivo (TPC).
- Concepção e implementação de um circuito condicionador de sinais, utilizando um retificador de onda completa de precisão, baseado na estrutura eletrônica do super-diodo, aumentando a relação sinal ruído (SNR).
- A comunicação sem fio utilizada foi baseada no protocolo de comunicação *ZigBee*.
- Desenvolvimento de um programa computacional com interface gráfica que expõe os resultados obtidos a partir do sistema de avaliação proposto.
- Análise do comportamento do sistema proposto quando submetido a uma descarga atmosférica. Foi apresentado um estudo e especificação dos ensaios de tensão residual para impulsos de corrente atmosférica. O ensaio de tensão residual para impulso atmosférico de corrente é importante de ser realizado com o sistema de medição, para que se possa avaliar a continuidade de seu funcionamento após a ocorrência de descargas atmosféricas.

O sistema de avaliação pode ser representado, para efeito didático, de forma modular. Ele é composto de diversos circuitos eletrônicos, os quais desempenham funções específicas e determinadas. A representação gráfica do sistema pode ser visualizada com auxílio da Figura 8.

Figura 8 – Diagrama de blocos do sistema de avaliação do nível de degradação de para-raios de ZnO.



Fonte: (MACÊDO, 2010).

### 3.3 Sistema de Monitoramento Sem Fio Proposto por Brito (2013)

Com base no trabalho desenvolvido por Lira (2012), desenvolveu-se um sistema de monitoramento da CFT, que possibilite enviar o sinal com a forma de onda da CFT do para-raios, por meio de uma rede de comunicação sem fio até a sala de comando da subestação. Dessa forma, é armazenado as formas de onda da corrente de fuga dos para-raios instalados em campo por um longo período de tempo. Com o armazenamento da corrente de fuga por um longo período de tempo, pode-se construir um banco de dados sobre o comportamento da corrente de fuga do para-raios ao longo do tempo e aplicar técnicas de monitoramento e diagnóstico mais eficientes e diversificadas. A seguir, pode-se observar algumas características do sistema de monitoramento proposto por Brito (2013b).

- Baseado nos estudos realizados por Lira (2007) referentes aos núcleos magnéticos, Brito (2013b) utiliza para o sensor de corrente, um núcleo toroidal a base de liga nanocristalina, denominado de N3E3.

- Utiliza um sistema microcontrolado para aquisição do sinal da corrente de fuga oriundo do sensor de corrente (sinal analógico) e converte para um sinal digital.

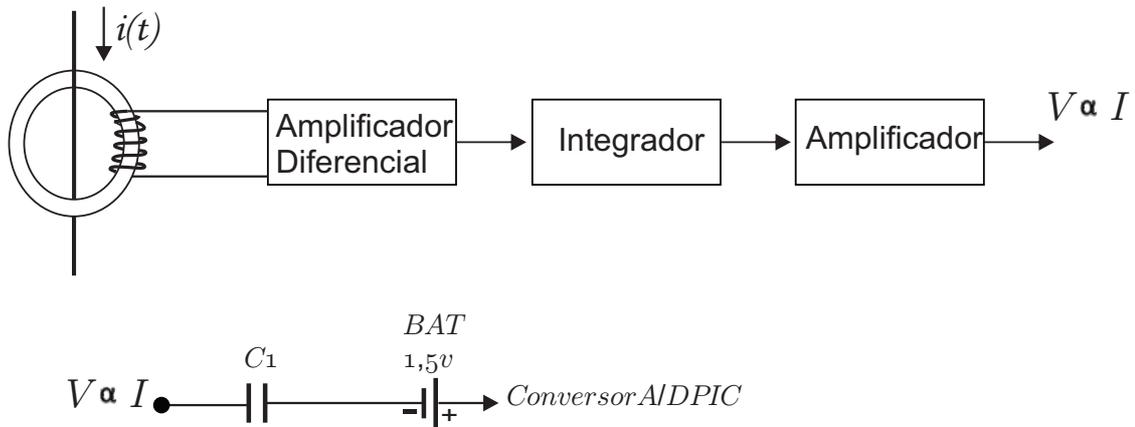
- Realiza a transmissão sem fio entre um conjunto de medição e um ponto distante.

- O circuito de aquisição da CFT é composto por um transformador de corrente (TC). A liga nanocristalina é apropriada para esse tipo de aplicação devido seu alto valor de permeabilidade magnética. Conectado ao TC, utilizou-se um amplificador diferencial do tipo amplificador de instrumentação (INA), que é um amplificador específico para amplificação de sinais de pequenas amplitudes e que permite a rejeição do ruído em modo comum existente no sinal proveniente do TC. Sabendo que a CFT  $i(t)$  de pequena amplitude que circula pelo para-raios induz no núcleo toroidal uma tensão proporcional ao fluxo magnético concatenado, e que esta tensão induzida é proporcional à derivada da corrente  $i(t)$ , faz-se necessário o uso de um circuito integrador no secundário do TC. Dessa forma, na saída do circuito integrador, tem-se um sinal de tensão proporcional a corrente que circula pelo para-raios. Para maiores informações sobre a formulação matemática utilizada no desenvolvimento e caracterização do sensor de corrente, sugere-se o estudo dos seguintes trabalhos: (LIRA, 2007) e (BATISTA, 2010).

- Para unidade de condicionamento do sinal, faz-se necessário adicionar um nível CC (corrente contínua) ao sinal da corrente de fuga, para torná-lo todo positivo possibilitando a digitalização. O nível CC foi adicionado através de uma pilha de 1,5 V.

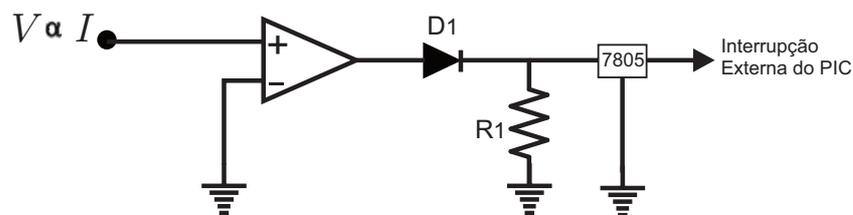
O sistema de monitoramento é representado, para efeito didático, de forma modular. Ele é composto de diversos circuitos eletrônicos, os quais desempenham funções específicas e determinadas. A representação gráfica do sistema é visualizada na Figura 9.

Figura 9 – Diagrama de blocos do sistema de monitoramento da corrente de fuga total.



Fonte: Adaptada de (BRITO, 2013b).

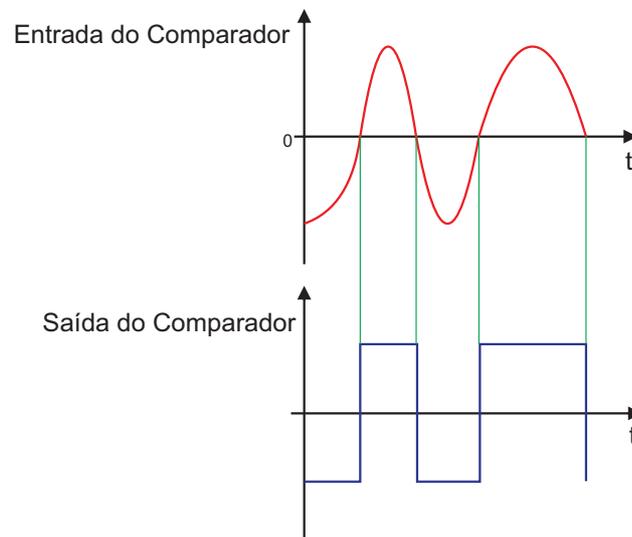
Para que o sinal desejado não possua formas de onda em janelas, foi adicionado ao projeto um circuito de gatilho. O circuito de gatilho faz com que o registro da forma de onda seja iniciado sempre no mesmo ponto (pico, cruzamento ascendente por zero, cruzamento descendente por zero, tensão de referência, etc). Na Figura 10 é ilustrado o circuito elétrico de gatilho utilizado.

Figura 10 – Circuito elétrico para o gatilho do sinal  $V \propto I$ .

Fonte: (BRITO, 2013b).

O circuito proporciona em sua saída uma forma de onda quadrada com amplitudes alternando entre +5 V e 0 V. Ao entrar com um sinal alternado  $V \propto I$ , na saída do Amplificador Operacional (AMPOP) tem-se um sinal alternado semelhante ao visualizado na Figura 11. Devido ao microcontrolador só permitir sinais positivos de no máximo +5 V foi utilizado um diodo retificador para ceifar o semi-ciclo negativo e um regulador de tensão para limitar a tensão de saída a +5 V.

Figura 11 – Formas de onda do circuito comparador de tensão.



Fonte: (BRITO, 2013b).

Apesar de [Lira \(2007\)](#) e [Macêdo \(2010\)](#) utilizarem o método da diferença de fase na decomposição da corrente de fuga total de para-raios de ZnO, os mesmos não realizaram ensaios que validassem o método empregado. Além disso, nota-se um erro associado ao método, quando aplicado para a decomposição da corrente de fuga em para-raios de ZnO: a comparação da diferença de fase de um sinal praticamente senoidal (sinal da tensão) com um sinal com componentes harmônicas significativas (sinal da corrente de fuga total).

Outro parâmetro de avaliação do estado de degradação do para-raios de ZnO exposta pelos autores [Lira \(2007\)](#) e [Macêdo \(2010\)](#) é a componente de 3ª ordem da corrente de fuga total. Embora a componente esteja relacionada à mudança da curva característica  $VXI$  dos para-raios, componentes harmônicas de 3ª ordem na tensão interferem significativamente nos resultados, o que diminui a confiabilidade do método em sistema com componentes harmônicas na tensão. Além disso, defeitos como a perda de estanqueidade com consequente penetração de umidade e poluição superficial praticamente não alteram a componente de 3ª ordem da corrente de fuga total dos para-raios de ZnO ([BRITO, 2013b](#)).

Os trabalhos de [Lira \(2007\)](#) e [Macêdo \(2010\)](#) apresentam a desvantagem da necessidade de medir o sinal de tensão aplicada sobre o para-raios, cuja realização do ponto de vista técnico-operacional é complexa devido à necessidade de se realizar conexões em transformadores de potencial.

Devido à falta de confiabilidade dos resultados dos métodos comumente empregados na avaliação do estado de degradação do para-raios com base nas componentes da corrente de fuga, a avaliação da forma de onda da corrente de fuga total, como observado no trabalho desenvolvido por [Lira \(2012\)](#), mostram-se uma alternativa para a busca de aplicações de

técnicas de monitoramento e diagnóstico mais eficientes e diversificadas.

Apesar do sistema de monitoramento proposto por Brito (2013b) apresentar um diferencial, já que faz uso da corrente de fuga total para futuro diagnóstico, o sistema ainda possui algumas limitações, tais como:

- O uso da pilha para adição do nível CC. O problema consiste na vida útil da pilha, já que sua descarga poderá ocasionar diminuição da tensão de *offset*, fazendo com que exista na entrada do conversor A/D do microcontrolador tensão negativa, o que pode danificá-lo;
- Não possui interface gráfica para o monitoramento em tempo real do estado de degradação do para-raios de ZnO;
- O sistema está susceptível a interferência externa, tais como campos eletromagnéticos oriundo do ambiente de subestação.
- Outra deficiência apresentada nos trabalhos de Lira (2007), Macêdo (2010) e Brito (2013b) consiste no monitoramento remoto possuindo limitações de acesso aos dados, sendo feito apenas em um computador fixo.

A fim de estabelecer o monitoramento remoto e *online*, foi necessário fazer uso do conceito de computação nas nuvens e de um ambiente de desenvolvimento *web*, que conjugasse ferramentas necessárias para a criação de um *site* dinâmico utilizado como interface do sistema proposto. A utilização de uma interface gráfica permite o acompanhamento em tempo real do estado de degradação do para-raios, por meio da forma de onda da corrente de fuga total, em qualquer lugar desde que se tenha *internet* em seu dispositivo, seja ele *notebook*, *smartphone* ou qualquer outro dispositivo com acesso à *internet*. Dessa forma, sua operação traz exatidão, eficiência e confiabilidade no monitoramento e conseqüentemente ao sistema elétrico.

### 3.4 Discussões Gerais Sobre os Sistemas de Monitoramento

Pelos trabalhos publicados e analisados na literatura, é evidente que existe uma série de sistemas de monitoramento propostos, com diferentes técnicas e métodos empregados. Os principais utilizam para o monitoramento do para-raios a medição da temperatura, o levantamento da curva *VXI*, a medição de descargas parciais, a decomposição da corrente de fuga total em suas componentes resistiva e capacitiva, outros realizam a decomposição harmônica e por fim, a medição da corrente de fuga total. A seguir, na Tabela 1, serão apresentados os métodos atualmente empregados, como também uma sinopse da revisão bibliográfica observada na Tabela 2.

Os procedimentos de medições diretas são aqueles que retornam diretamente uma grandeza elétrica relacionada à operação do equipamento, em contrapartida, os indiretos

retornam grandezas que não são elétricas, por exemplo, temperatura interna do para-raios.

Tabela 1 – Tabela comparativa entre métodos atualmente empregados.

<b>Método</b>	<b>Medição</b>	<b>Aquisição</b>	<b>Meio</b>	<b>Grandeza</b>
Medição da Temperatura	Indireta	<i>on-line</i>	Termovisor	Temperatura
Medição da Corrente de Fuga	Direta	<i>on-line</i>	LCM	Componente resistiva e Harmônica de 3 <sup>a</sup> ordem
Levantamento da Curva $VXI$	Direta	<i>off-line</i>	Kit de Alta Tensão	Tensão e Corrente
Medição de Descargas Parciais	Direta	<i>off-line</i>	Kit de Alta Tensão	Descargas Parciais
Sistema Proposto	Direta	<i>on-line</i>	Sensor de Corrente	Corrente de Fuga Total

Tabela 2 – Síntese da revisão bibliográfica.

<b>Referência</b>	<b>Proposição</b>	<b>Requisito</b>	<b>Interface Gráfica</b>
<a href="#">Lira (2007)</a>	Decomposição da Corrente via Defasagem entre Tensão e CFT	Medição da CFT e Tensão Aplicada	Osciloscópio e Matlab <sup>®</sup> (Local)
<a href="#">Macêdo (2010)</a>	Decomposição da Corrente via Defasagem entre Tensão e CFT	Medição da CFT e Tensão Aplicada	<i>Software</i> Desenvolvido (Local)
<a href="#">Brito (2013b)</a>	Estimação da CFT	Medição da CFT	Osciloscópio Matlab <sup>®</sup> (Local)

## 4 METODOLOGIA

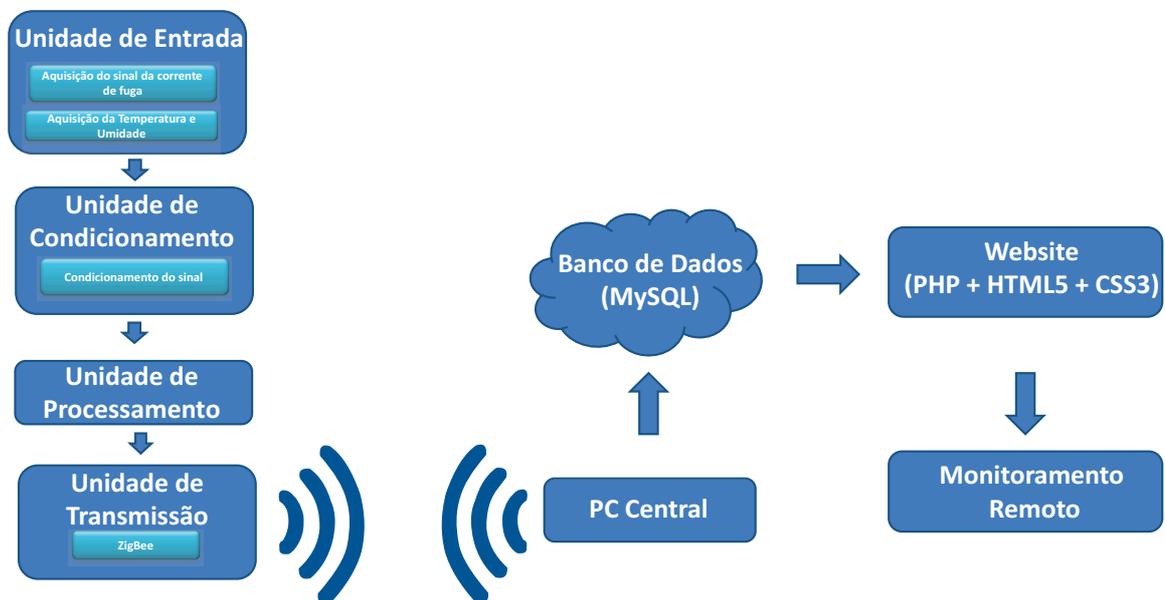
Este capítulo trata das atividades de planejamento, montagem e execução de ensaios de laboratório necessários ao desenvolvimento do sistema de monitoramento remoto de para-raios de ZnO baseado na medição da corrente de fuga total. Inicialmente, são apresentadas as partes constituintes do sistema proposto, assim como, suas principais características. Em seguida é apresentado o ambiente de ensaio e validação do sistema.

Com base na revisão bibliográfica e nos ensaios realizados, o sistema desenvolvido associa características já mencionadas na literatura e apresenta inovações no que diz respeito à confiabilidade, eficiência, precisão e continuidade no monitoramento.

O sistema de monitoramento descrito neste trabalho é composto de diversos circuitos eletrônicos denominados de unidades, que serão expostas ao longo do capítulo.

A partir da Figura 12 é possível visualizar a representação em blocos de todo sistema de monitoramento proposto.

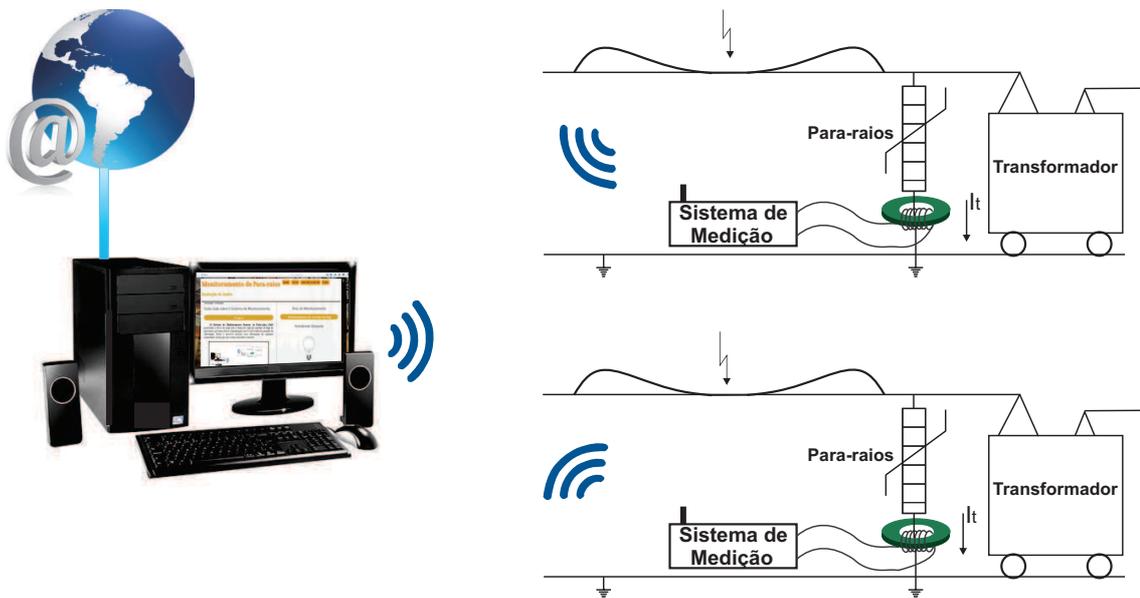
Figura 12 – Diagrama de blocos do sistema de monitoramento da corrente de fuga total.



Fonte: (Próprio Autor).

Observa-se na Figura 13 o diagrama esquemático proposto do sistema de monitoramento, o qual é composto essencialmente por módulos de monitoramento (dispositivos finais) alocados em para-raios ao longo da subestação (configuração em estrela), fazendo comunicação direta com um computador central, chamado de coordenador.

Figura 13 – Diagrama Esquemático do Sistema de Monitoramento.



Fonte: (Próprio Autor).

## 4.1 Unidade de Entrada

### 4.1.1 Obtenção do Sinal da Corrente de Fuga Total

Um sistema de monitoramento de para-raios baseado na medição da CFT necessita de uma entrada com o sinal de corrente de fuga que percorre o para-raios. O circuito de aquisição da corrente de fuga é composto por um Transformador de Corrente (TC). O TC foi desenvolvido com o mesmo núcleo utilizado por Lira (2007) e Macêdo (2010), denominado N3E3 (Figura 14). O TC é composto por uma espira no primário, que corresponde ao condutor de aterramento do para-raios, e no secundário o TC possui 26 espiras produzidas com fio esmaltado cuja bitola possui área de seção transversal  $0,13 \text{ mm}^2$ , o que corresponde comercialmente, no padrão americano, ao fio 26 AWG.

Conectado ao TC, utilizou-se um amplificador diferencial, que é um amplificador de instrumentação (INA) para a amplificação de sinais de pequenas amplitudes e que permite a rejeição do ruído em modo comum existente no sinal proveniente do TC. O número de espiras não é um fator crítico quando se utiliza um amplificador de instrumentação e um núcleo de alta permeabilidade magnética, pois o amplificador de instrumentação pode ter um ganho de até 10000, com um erro relativamente baixo,  $\pm 1\%$ . Para o TC desenvolvido poder monitorar correntes entre 0,5 a 5 mA, sugere-se de 20 a 40 espiras (LIRA, 2007).

<sup>2</sup> Disponível em: <<https://pt.aliexpress.com/item/22mm-x-14mm-x-8mm-Power-Transformer-Ferrite-Toroid-Cores-Green-10-Pcs/32693823976.html?spm=2114.42010708.4.123.2EbZJ2>>.

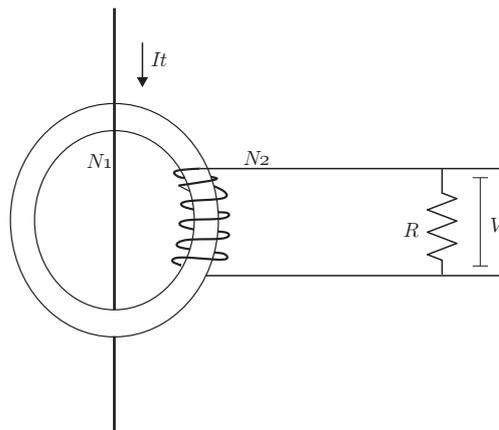
Figura 14 – Núcleo toroidal N3E3.



Fonte: (aliexpress.com, 2017).

Na Figura 15 é apresentado o diagrama esquemático de um sensor de corrente.

Figura 15 – Diagrama esquemático de um sensor indutivo.



Fonte: (Próprio Autor).

A lei de Ampère estabelece que a integral de linha da intensidade do campo magnético  $H$ , em qualquer percurso fechado é exatamente igual à corrente enlaçada pelo percurso, sendo assim, com  $H$  constante, integra-se a parcela ao longo do caminho, o comprimento da circunferência  $l$  é dado pelo produto entre  $2\pi$  e o raio médio  $r$  do núcleo toroidal, conforme a equação (4.1):

$$\oint H dl = H 2\pi r = i(t). \quad (4.1)$$

De acordo com a lei de Faraday, as equações (4.2) e (4.3) mostram que a tensão induzida no núcleo ( $V_s$ ) é proporcional a derivada do fluxo magnético e pelo número de

espiras  $N_2$  do secundário do transformador de corrente:

$$V_s = N_2 \frac{d\phi}{dt}, \quad (4.2)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = A \frac{dB}{dt} = \mu A \frac{dH}{dt}. \quad (4.3)$$

A derivada do fluxo magnético é igual à área  $A$  da secção transversal do núcleo, multiplicada pela derivada da densidade de fluxo magnético  $B$ , aplicando a lei de Ampère:

$$H = \frac{N_1 i(t)}{l}. \quad (4.4)$$

Derivando a equação (4.4), obtém-se (4.5):

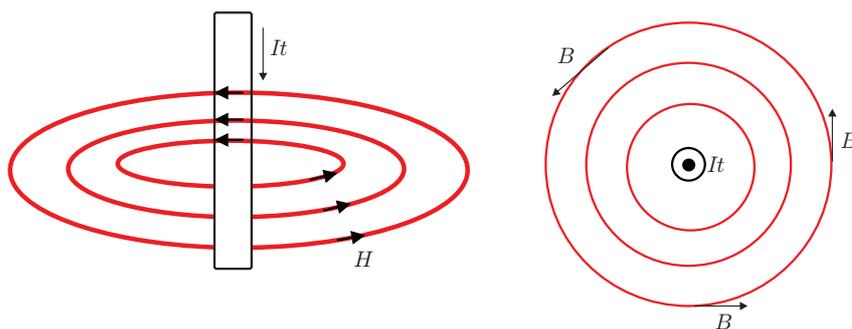
$$\frac{dH}{dt} = \frac{N_1}{l} \frac{di(t)}{dt}. \quad (4.5)$$

Substituindo-se (4.5) em (4.3) obtém-se (4.6), que mostra a dependência do fluxo magnético com a corrente:

$$\frac{d\phi}{dt} = \mu A \frac{N_1}{l} \frac{di(t)}{dt}. \quad (4.6)$$

É possível visualizar na Figura 16 o diagrama do fluxo magnético.

Figura 16 – Diagrama do fluxo magnético.



Fonte: (Próprio Autor).

Para maiores informações sobre a formulação matemática utilizada no desenvolvimento e caracterização do sensor de corrente, sugere-se o estudo dos seguintes trabalhos: (LIRA, 2007) e (BATISTA, 2010).

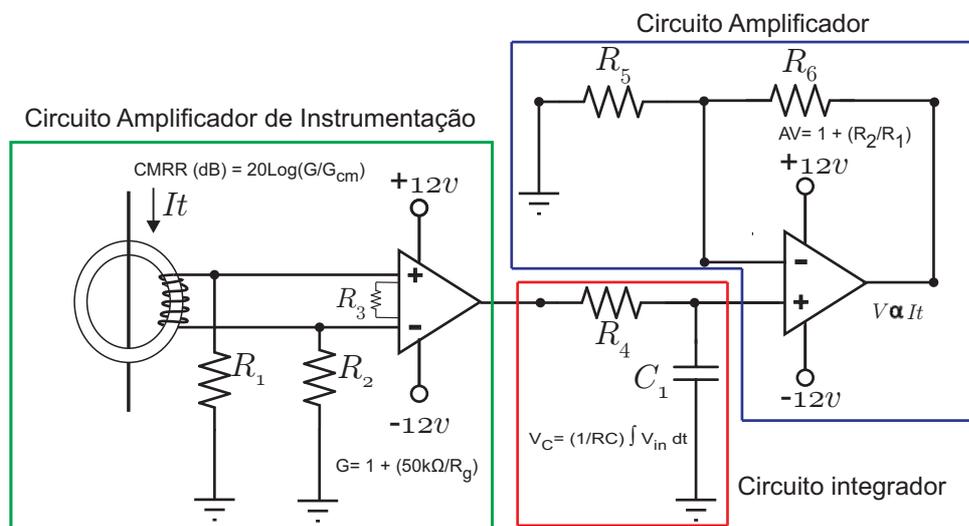
Na saída do integrador haverá uma tensão diretamente proporcional a corrente de fuga que percorre o para-raios. Isso ocorre, pois a corrente de fuga  $i(t)$  de pequena

amplitude que circula pelo para-raios induz no núcleo toroidal uma tensão proporcional a derivada do fluxo magnético concatenado, e que esta tensão induzida é proporcional à derivada da corrente  $i(t)$ . Por esse motivo que é utilizado um integrador (LOPES et al., 2016).

Após o circuito integrador utilizou-se um amplificador para elevar esse sinal, melhorando assim a sua resolução.

Na Figura 17 é mostrado o diagrama elétrico utilizado na implementação do circuito de aquisição da corrente de fuga do para-raios de ZnO.

Figura 17 – Diagrama esquemático da unidade de entrada.



Fonte: (Próprio Autor).

Os componentes do sensor de corrente são ajustados de forma a ter a relação desejada da tensão proporcional a corrente. Assim, utilizou-se uma proporção de 1 V para cada 1 mA na saída do circuito. O sinal obtido na saída do circuito apresenta *offset* devido à influência do ambiente e aos amplificadores operacionais, na intenção de eliminá-lo utilizou-se um filtro passa-altas melhor explicado na seção de condicionamento.

Para o circuito do amplificador de instrumentação foram utilizados os resistores  $R_1$  e  $R_2$  para definir uma tensão diferencial (BATISTA, 2015). O resistor  $R_3 = R_G$  é responsável pelo ganho de tensão, caracterizado pela equação (4.7):

$$G = 1 + \frac{50 k\Omega}{R_G}. \quad (4.7)$$

Como a corrente de fuga total do para-raios possui uma baixa amplitude, quando submetida à tensão de operação, seu sinal pode vir camuflado já que o sinal proveniente do TC é compatível com outros sinais externos (ondas de rádio, indução de tensões de

circuitos adjacentes, efeito corona, etc). Diante disso, torna-se evidente a importância de um dispositivo que consiga eliminar esse tipo de perturbação.

A principal característica do INA é o CMRR (*Common Mode Rejection Ratio*) Relação de Rejeição em Modo Comum, que é a capacidade que o dispositivo tem de rejeitar o sinal comum as suas entradas, por exemplo, ruídos. A CMRR geralmente é fornecida no catálogo do fabricante na escala dB (decibel), mas pode ser determinado empiricamente segundo a seguinte expressão:

$$CMRR(dB) = 20 \log_{10} \left( \frac{G}{G_m} \right). \quad (4.8)$$

Onde:  $G$  é o ganho de tensão em modo diferencial e  $G_m$  o ganho de tensão no modo comum.

O INA utilizado possui um CMRR de 120 dB, para uma faixa de ganho de tensão no modo diferencial de 100 a 1000 (TEXAS-INSTRUMENTS, 2015).

#### 4.1.2 Obtenção do Valor da Temperatura Ambiente e Umidade

A corrente de fuga em para-raios de ZnO é fortemente influenciada pela temperatura ambiente quando o para-raios está operando na região de baixa corrente, ou seja, em regime normal de operação. Portanto, faz-se necessário o registro da temperatura para que seja aplicado um fator de correção, e dessa forma possibilitar relacionar a corrente de fuga com o estado real de degradação do para-raios (BRITO, 2013b).

Para tal, foi utilizado o sensor DHT11 que oferece saídas digitais, calibrado para temperatura e umidade (BATISTA, 2015). O sensor foi conectado ao sistema de processamento, já que temperatura e umidade são variáveis importantes no diagnóstico dos para-raios (BATISTA; LOPES; LIRA, 2015); (LOPES et al., 2016). O circuito e funcionamento desse sensor está melhor explicado no ANEXO A.

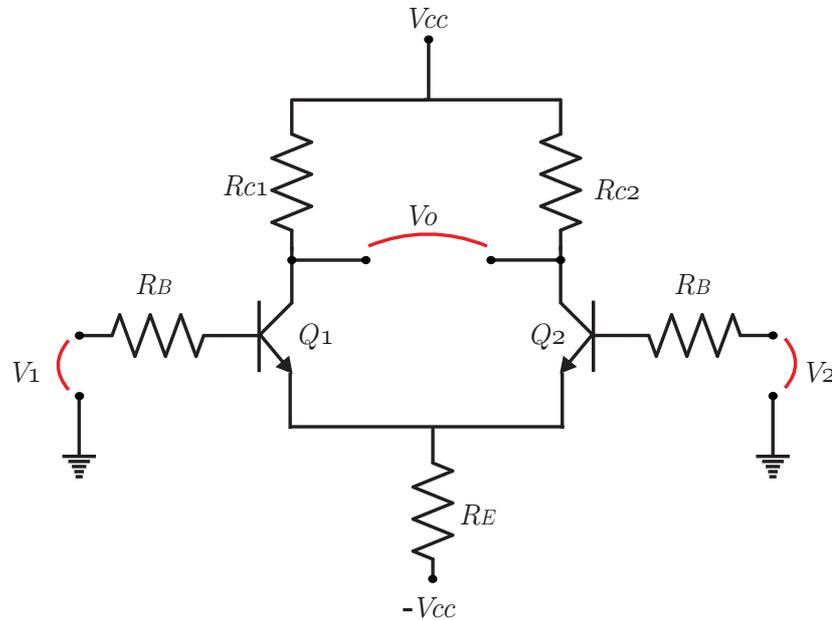
## 4.2 Unidade de Condicionamento

O conversor A/D de um microcontrolador pode operar numa faixa de tensão de 0 a 5 V na entrada, sabendo que todo conversor A/D possui uma referência inferior e superior para operar, sendo os valores citados os mais empregados. O sinal adquirido na saída da unidade de entrada é composto de uma parte negativa, o que provocaria danos ao microcontrolador.

Então para resolver este empecilho foi criado um circuito de condicionamento que recebe o sinal da unidade de entrada, então passa por um filtro passa-altas, na intenção de eliminar ruídos e nível CC, e em seguida é acrescido o valor necessário para condicionar

o sinal ao nível de tensão que o microcontrolador suporta. Segue uma breve explicação e solução para o nível CC.

Figura 18 – Circuito de um amplificador operacional elementar.



Fonte: (Próprio Autor).

Idealmente, a tensão de saída do amplificador deveria ser nula quando  $V_1 = V_2 = 0$ . Todavia, devido às diferenças existentes nas características de  $Q_1$  e  $Q_2$ , tem-se um desbalanceamento das correntes no circuito e, conseqüentemente:

$$V_{BE1} \neq V_{BE2}. \quad (4.9)$$

A diferença, em módulo, entre esses valores de  $V_{BE}$  é denominada de "Tensão de *offset* de entrada", e será representada por  $V_i$  (*offset*).

$$V_i(\text{Offset}) = |V_{BE1} - V_{BE2}|. \quad (4.10)$$

Essa tensão de *offset* de entrada se comporta como um sinal diferencial aplicado nas entradas do amplificador e produz uma tensão diferencial na saída (proporcional ao ganho) do mesmo. Essa tensão de saída é denominada "Tensão de *offset* de saída" (ou tensão de erro de saída) e será representada por  $V_o$  (*offset*).

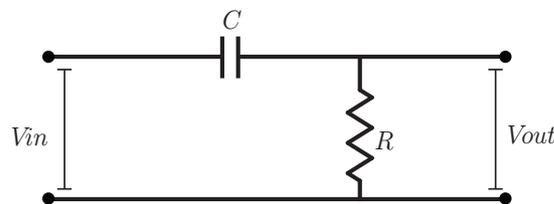
Em circuitos de alta precisão, é preciso minimizar ou eliminar essa tensão de erro na saída do dispositivo.

Alguns amplificadores operacionais possuem os terminais para o ajuste da tensão de *offset* de saída. Entretanto, existem outros que não possuem esses terminais e o projetista deverá montar um circuito externo para executar esse ajuste.

Segundo Wendling (2010), quando o amplificador operacional não possui os terminais para o ajuste do *offset*, o mesmo deverá ser feito através de circuitos resistivos externos, denominados de resistores de equalização. Mesmo com esse ajuste, a tensão de erro poderá ser reduzida, mas não anulada.

Tendo em vista a necessidade de se suprimir por completo essa tensão indesejada, é proposta uma nova maneira de eliminá-la, com o uso de um filtro passivo passa-altas, conforme ilustra a Figura 19.

Figura 19 – Circuito de um filtro passivo passa-altas RC.



Fonte: (Próprio Autor).

Para sinais de alta frequência, o capacitor apresenta baixa reatância capacitiva ( $X_C \ll R$ ) e o seu comportamento tende a um curto-circuito. Desta forma, a maior parcela da tensão de entrada estará sobre o resistor de saída. Desse modo, são filtrados os sinais de baixa frequência, a fim de permitir a passagem apenas de sinais de alta frequência (MUSSOI, 2004).

Para sinais de baixa frequência, o capacitor apresenta alta reatância capacitiva ( $X_C \gg R$ ) e o seu comportamento tende a um circuito aberto. Desta forma, a maior parcela da tensão de entrada estará sobre o capacitor e a tensão sobre o resistor de saída será muito pequena. Pode-se dizer que o circuito impede a passagem de sinais de baixa frequência (MUSSOI, 2004).

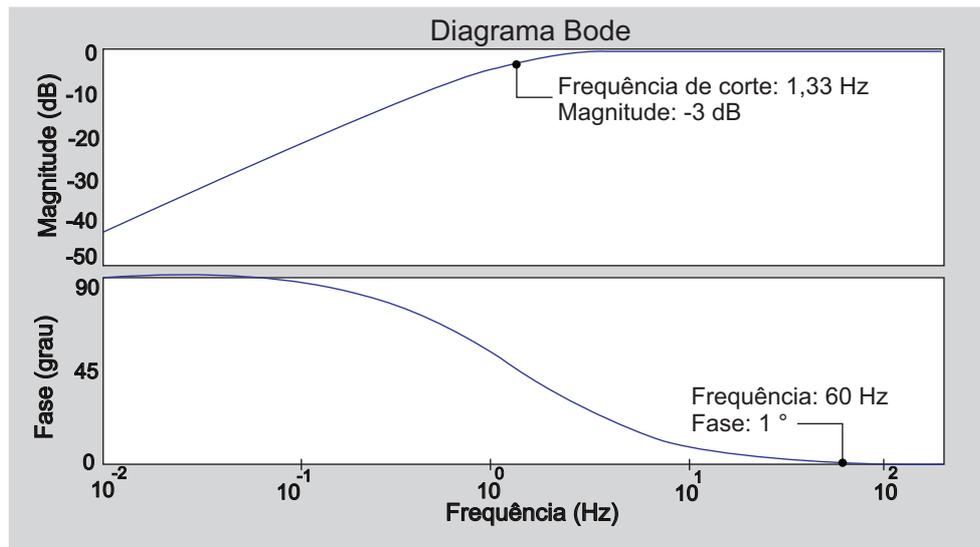
Como a tensão de *offset* é uma tensão contínua, ou seja, frequência zero, o filtro rejeita tensões contínuas.

$$H(s) = \frac{R}{R + (\frac{1}{j\omega C})} \quad (4.11)$$

$$H(s) = \frac{j\omega RC}{j\omega RC + 1} \quad (4.12)$$

Após determinar a função de transferência, utilizou-se ferramentas computacionais para plotagem e análise gráfica do filtro passivo. A Figura 20 apresenta o diagrama de Bode.

Figura 20 – Representação da fase e frequência do filtro.



Fonte: (Próprio Autor).

Para que fosse obtida uma menor defasagem utilizou-se  $R \gg C$ . Dessa forma a frequência de corte é de  $f = 1,33$  Hz.

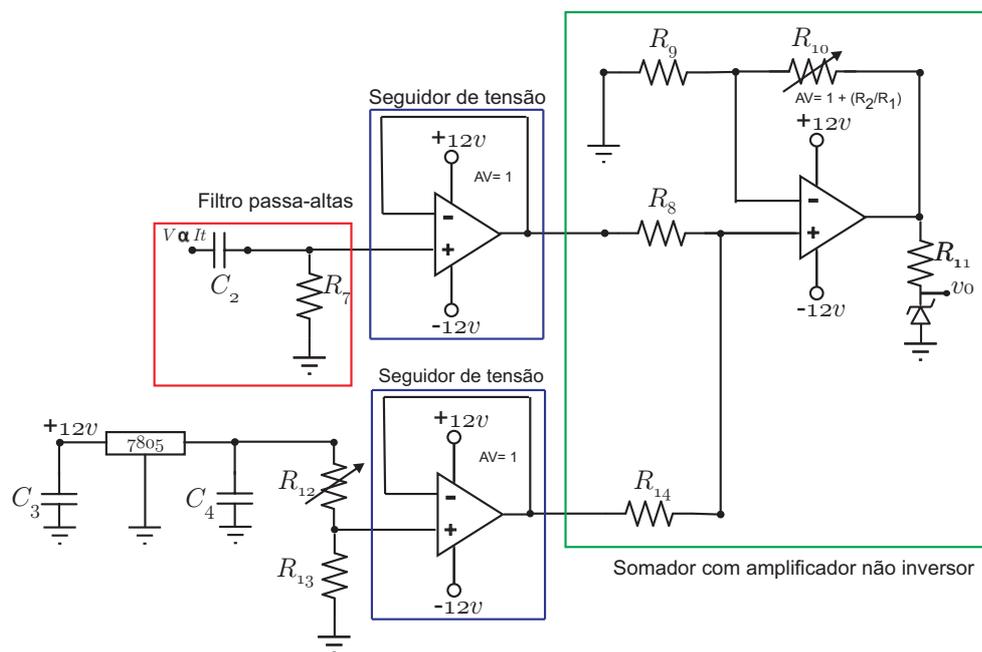
Assim, nessas condições irá haver uma pequena defasagem na ordem de  $\alpha = 1^\circ$  para frequência de 60 Hz, algo imperceptível.

Na Figura 21 é possível visualizar o circuito elétrico da unidade de condicionamento. O circuito além do filtro supracitado possui ainda um seguidor de tensão para isolar o sinal, o CI 7805 e um divisor de tensão para condicionar ao nível de tensão apropriado, para que o sinal esteja na margem de tensão aceitável pelo microcontrolador, e um circuito somador para somar o sinal filtrado com o nível CC desejado.

Foi confeccionada uma placa de circuito impresso (PCI) com as unidades de entrada e condicionamento já interligadas. Na Figura 22 é possível observar a fotografia da PCI.

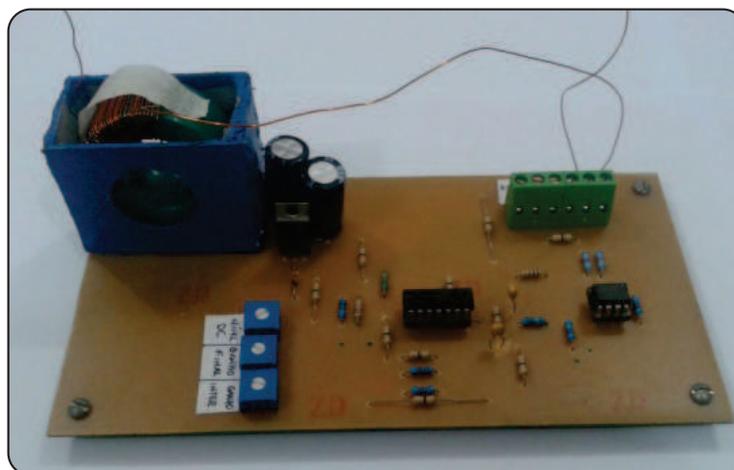
Segue no APÊNDICE B.1 o *layout* da PCI da unidade de entrada e condicionamento do sinal.

Figura 21 – Diagrama esquemático da unidade de condicionamento.



Fonte: (Próprio Autor).

Figura 22 – Fotografia das unidades de entrada e condicionamento.



Fonte: (Próprio Autor).

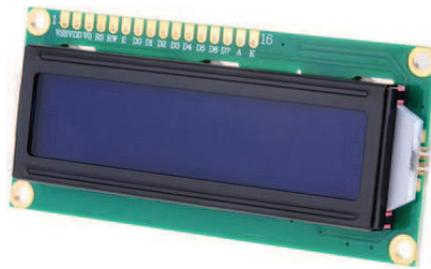
### 4.3 Unidade de Processamento

A unidade de processamento é a parte do sistema, que realiza as instruções a partir de um computador, para executar a aritmética básica, lógica, e a entrada e saída de dados.

Para o trabalho utilizou-se o microcontrolador PIC 18F452, melhor detalhado no ANEXO B. Através do conversor Analógico/Digital (A/D) do microcontrolador, a corrente de fuga é armazenada na memória interna e após o comando específico esses dados são enviados por um sistema sem fio melhor explicado no sistema de transmissão na Seção 4.4.

Para fazer a visualização no local (*in loco*), foi incorporado ao sistema um *display* LCD 16x2, dessa forma, é possível ter acesso às informações como data, hora, temperatura, umidade, indicadores de leitura e impressão dos dados que estão sendo executadas em tempo real. Na Figura 23 é possível observar o *display* utilizado.

Figura 23 – Fotografia da tela de cristal líquido.



3

Fonte: (filipeflop.com, 2017).

O primeiro passo para o processamento digital do sinal da corrente de fuga, originalmente analógico, foi a sua transformação para digital, envolvendo circuitos de amostragem e retenção (*Sample & Hold*), responsáveis por manter a tensão fixa durante o processo de conversão A/D. No presente trabalho as amostras da corrente de fuga sobre o para-raios são adquiridas antes de serem aplicadas ao conversor A/D.

Considerando  $T_A$  como período de amostragem e  $f_A$  a frequência de amostragem, em que

$$T_A = \frac{1}{f_A}, \quad (4.13)$$

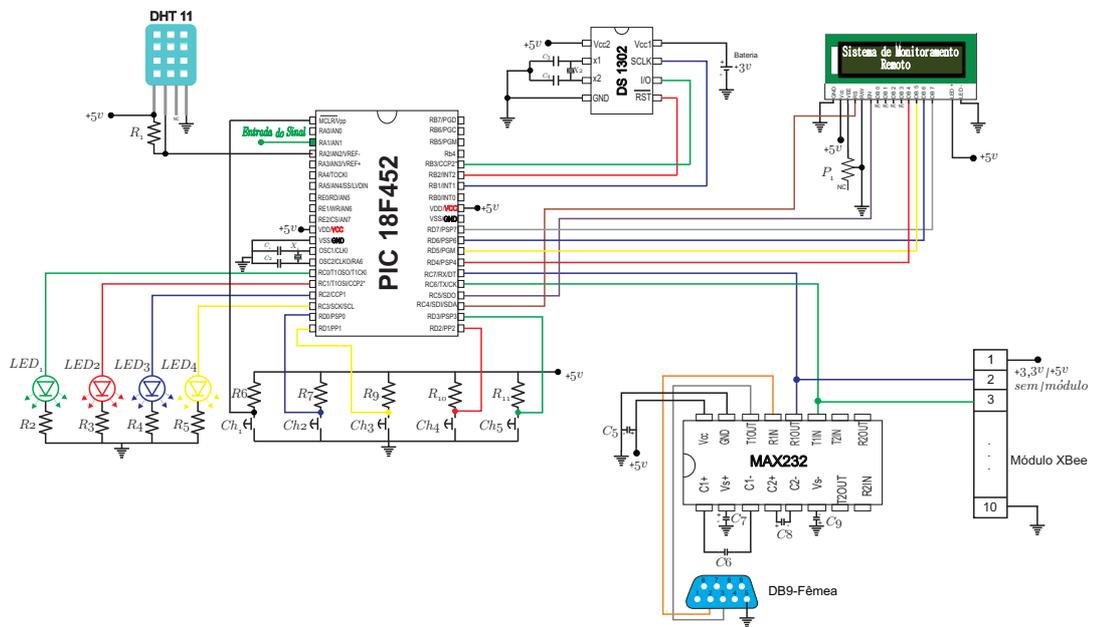
Entretanto, o valor do número de amostras  $N$  por segundo deverá ser no mínimo, o dobro da maior frequência presente no sinal de acordo com o Teorema de *Nyquist* (OPPENHEIM; SCHAFER, 1975).

$$N = \frac{f_A}{f}. \quad (4.14)$$

<sup>3</sup> Disponível em: <<http://www.filipeflop.com>>

Como foi escolhido 350 amostras, tem-se que  $f_A = 21$  kHz, a uma taxa de amostragem  $T_A = 47,6 \mu s$ . Na Figura 24 é possível visualizar o circuito elétrico da unidade de processamento.

Figura 24 – Diagrama esquemático da unidade de processamento.



Fonte: (Próprio Autor).

Foi confeccionada uma placa de circuito impresso para unidade de processamento, a fim de eliminar maus contatos e interferências. É possível observar na Figura 25 a PCI.

Figura 25 – Fotografia da unidade de processamento.



Fonte: (Próprio Autor).

## 4.4 Unidade de Transmissão e Recepção

Optou-se pela transmissão de dados utilizando um sistema de comunicação sem fio, por apresentar as seguintes vantagens:

**Flexibilidade:** Dentro da área de cobertura, uma determinada estação pode se comunicar sem nenhuma restrição. Além disso, permite que a rede alcance lugares onde os fios não poderiam chegar.

**Facilidade:** A instalação pode ser rápida, evitando a passagem de cabos através de paredes, canaletas e forros, portanto uso mais eficiente do espaço físico. Redução do custo.

**Diversas topologias:** Podem ser configuradas em uma variedade de topologias para atender a aplicações específicas. As configurações são facilmente alteradas, facilidade de expansão e manutenção reduzida.

O protocolo transmite dados por meio de ondas de rádio por uma frequência de 2,4 GHz com imunidade e sem interferências transmitindo dados a taxas de transferências entre os 20 kbit/s e 250 kbit/s. Esta faixa de frequência foi originalmente reservada por órgãos internacionais para o desenvolvimento de sistemas de comunicação sem fio para aplicações na frequência ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), sendo regulamentada na Europa com a frequência de 868 MHz (1 canal), 915 MHz (10 canais) e nos Estados Unidos e em outras partes do mundo com o valor de 2,4 GHz (16 canais).

*ZigBee* IEEE 802.15.4 foi desenvolvida pela *ZigBee Alliance* junto com o IEEE (*Institute of Electrical and Eletronics Engineers*). A rede de sensores desenvolvida além de permitir o acompanhamento em tempo real da corrente de fuga dos para-raios de ZnO, possibilita que o operador visualize esse sinal de qualquer lugar.

Utilizou-se o módulo *XBee-pro* devido ao seu alcance de 90 m interno e 3200 m externo, operando em 2,4 GHz, por ter baixo consumo de energia, tornou-se apropriado para aplicações portáteis. Pode-se observar a partir da Figura 26 a fotografia do módulo utilizado.

Em uma rede de sensores sem fio utilizando o protocolo *ZigBee*, as topologias suportadas são: rede em malha (*mesh networking*), rede em estrela (*star networking*) e rede em árvore (*cluster-tree*). A primeira é caracterizada por estabelecer o melhor caminho na rede em malha, de modo que, caso haja alguma falha em um nó específico, o caminho é refeito de modo automático. O segundo é denominado de rede em estrela, pois há um nó coordenador no centro de vários outros nós coordenados. O terceiro é descrito por uma hierarquia constituída por um nó coordenador, nós roteadores e vários nós dispositivos finais (NASCIMENTO; LOPES, 2016). A topologia utilizada no trabalho foi em estrela, pela simplicidade da aplicação.

Figura 26 – Fotografia do módulo de comunicação Xbee-pro baseado na tecnologia ZigBee.



Fonte: (Próprio Autor).

#### 4.4.1 Comunicação RS 232

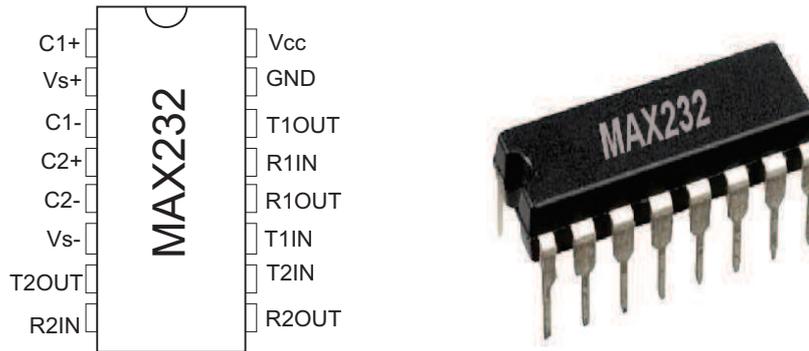
Para uma maior flexibilidade com a comunicação externa foi disponibilizada uma saída do tipo RS 232 através do circuito integrado MAX 232 e controlada pelas rotinas computacionais de entrada e saída visando a conectividade com outros dispositivos.

O módulo de aquisição de dados dispõe de uma interface do tipo RS 232 visando à transmissão serial de dados. Esta interface faz uso de um protocolo serial, no qual os dados são enviados em pacotes que se repetem continuamente, iniciando com bits de inicialização, informando ao receptor que o pacote está sendo atualizado. Em seguida são enviados os dados correspondentes a cada medição com o controle de erro respectivo para o pacote de dados enviado (LIRA, 2007).

Os sinais elétricos na porta serial (RS 232) possuem níveis de tensão entre +15 V e -15 V. Na RS 232 o nível lógico baixo tem nível de tensão entre -15 V e -3 V e o nível lógico alto tem nível entre +3 V e +15 V.

A maioria dos microcontroladores disponíveis no mercado possui um USART (*Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter*). Um exemplo é o microcontrolador PIC 18F452. O USART possui capacidade de comunicação RS 232 no modo assíncrono com velocidade de até 115000 bps (bits por segundo), dependendo exclusivamente do cristal utilizado no *clock* de operação do microcontrolador. O USART se comunica com o mundo exterior através de dois pinos, o *TX* e *RX*. Outro ponto importante sobre os pinos do PIC é que quando utiliza-se o USART interna, os pinos *RB<sub>1</sub>* e *RB<sub>2</sub>* não podem mais ser utilizados como pinos de Input/Output (I/O) comuns (digitais). Note que os níveis utilizados pelo PIC são os níveis TTL enquanto o utilizado pelo PC é o RS 232, dessa forma, para compatibilizar um nível ao outro, é necessário um conversor de níveis de TTL para RS 232 e vice-versa. Neste trabalho foi utilizado MAX 232 (BATISTA, 2015). A Figura 27 apresenta o diagrama de pinos do CI MAX 232.

Figura 27 – Diagrama de pinos e fotografia do CI MAX 232.



Fonte: (Próprio Autor).

## 4.5 Fonte de Alimentação CC

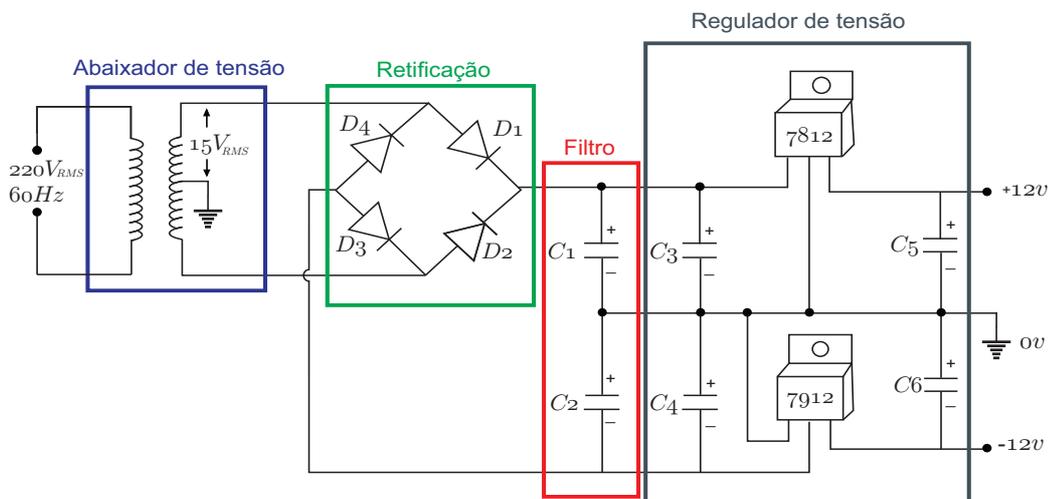
Para alimentação de todo circuito elétrico foi utilizado uma fonte de tensão simétrica, que é empregada quando se necessita de tensões positivas e negativas como na alimentação de amplificadores operacionais.

Características:

- Tensão de Entrada (alternada):  $220 V_{RMS}$ ;
- Tensão de Saída (contínua):  $+ 12 V$ ,  $- 12 V$  e  $GND$  ( $0 V$ );
- Corrente Máxima:  $1 A$ .

Na Figura 28 é possível visualizar o diagrama elétrico da fonte de alimentação.

Figura 28 – Fonte de tensão simétrica CC.



Fonte: (Próprio Autor).

O transformador recebe da rede 220 V no lado de alta e abaixa para 2 x 15 V, estas tensões são retificadas pelos quatro diodos ( $D1$ ,  $D2$ ,  $D3$  e  $D4$ ). A retificação já é feita de modo a atingir tensões simétricas em relação à saída central do transformador que passa a ser o ponto de zero *Volt* do circuito. A filtragem da tensão retificada é realizada por dois capacitores eletrolíticos  $C_1$  e  $C_2$ . A família de CI LM 78xx e LM 79xx são os reguladores de tensões positiva e negativa, esse CI também possui proteção contra sobre temperatura e curto-circuito. Na saída dos reguladores há dois capacitores de filtragem e dois de desacoplamento. Os capacitores menores servem para desviar eventuais pulsos de comutação rápido (ruídos) que não seriam absorvidos pelos eletrolíticos em vista de sua indutância residual. A fonte possui ainda um fusível de 1 A para proteção contra eventuais curtos-circuitos. É possível visualizar a fotografia do circuito elétrico da fonte, conforme ilustrado na Figura 29.

Figura 29 – Fotografia da fonte de tensão simétrica CC.

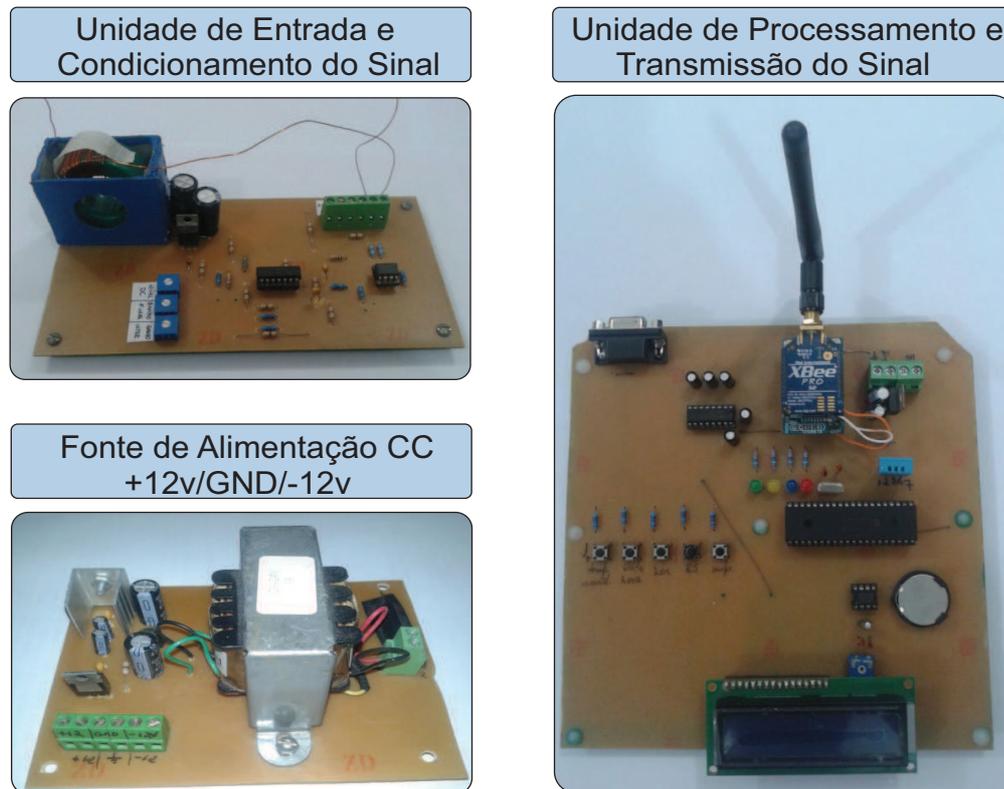


Fonte: (Próprio Autor).

Observa-se no APÊNDICE B.3 o *layout* da PCI da fonte de alimentação.

Pode-se observar a partir da Figura 30, uma síntese fotográfica das unidades, bem como da fonte de tensão confeccionada.

Figura 30 – Fotografias das PCIs desenvolvidas.



Fonte: (Próprio Autor).

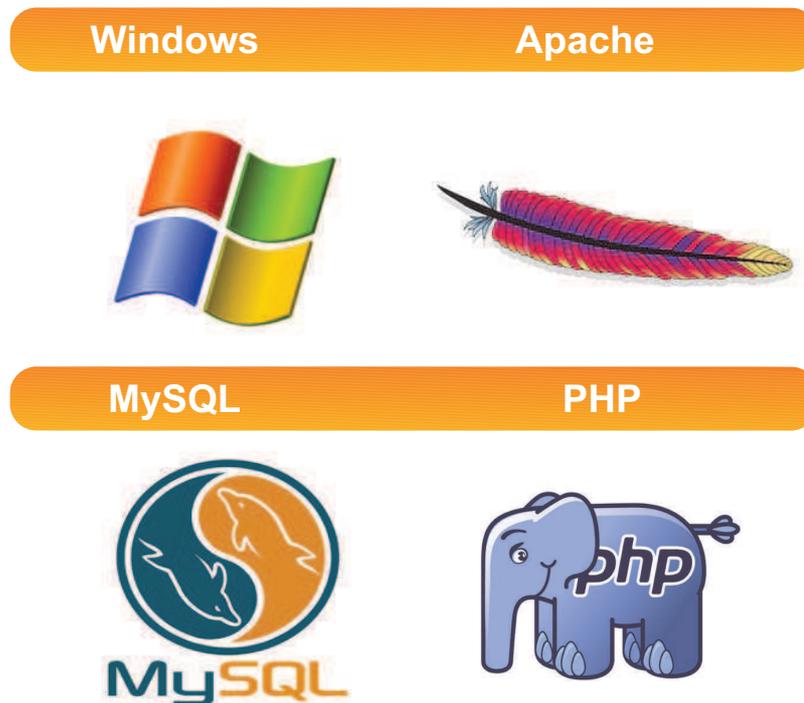
## 4.6 Interface Gráfica

Para o acompanhamento da corrente de fuga total e posterior análise desse sinal, optou-se pela criação de uma aplicação *web*. Assim, os dados não se encontrarão em um computador específico como em outros sistemas de monitoramento, mas em um banco de dados *on-line*.

Com a computação nas nuvens (*cloud computing*), muitos aplicativos, arquivos e outros dados relacionados, não precisam estar instalados ou armazenados no computador do usuário ou em um servidor próximo. Dessa forma, esse conteúdo passa a ficar disponível na *internet*. Para tanto, foi necessária a instalação e estudo de um ambiente de desenvolvimento *web* para o sistema operacional *Windows*<sup>®</sup>.

A aplicação que conjuga várias tecnologias fornecendo ferramentas que facilitam a criação de *sites* dinâmicos e que possui um conjunto de *softwares* mais usado é o WAMP (*Windows*<sup>®</sup>, *Apache*, *MySQL*, *PHP*) (Figura 31).

Figura 31 – Desenvolvedor WAMP.



Fonte: (Próprio Autor).

Nesse conjunto de aplicações, inclui-se, respectivamente, o sistema operacional *Windows*<sup>®</sup>; o servidor *web Apache*, ambiente de processamento de todas as informações solicitadas pelo usuário ao acessar determinada página, sendo o responsável pela publicação de documentos, imagens ou qualquer outro objeto que venha a ser acessado por um usuário por meio de um navegador; o sistema gerenciador de banco de dados *MySQL*, o serviço dispõe da linguagem SQL (*Structure Query Language*, Linguagem de Consulta Estruturada); por fim, o pacote possui a linguagem de programação em PHP, que permite criar *sites web* dinâmicos, possibilitando a interação com usuários através de formulário, parâmetros da URL e *links*. O PHP é executado no servidor, sendo enviado para o cliente apenas o código na linguagem HTML, assim é possível comunicar-se com o banco de dados, sem que o código fonte seja revelado (TAURION, 2009); (NOGUEIRA; PEZZI, 2009).

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

Figura 32 – (a) Página inicial. (b) Página de acesso.

(a)

(b)



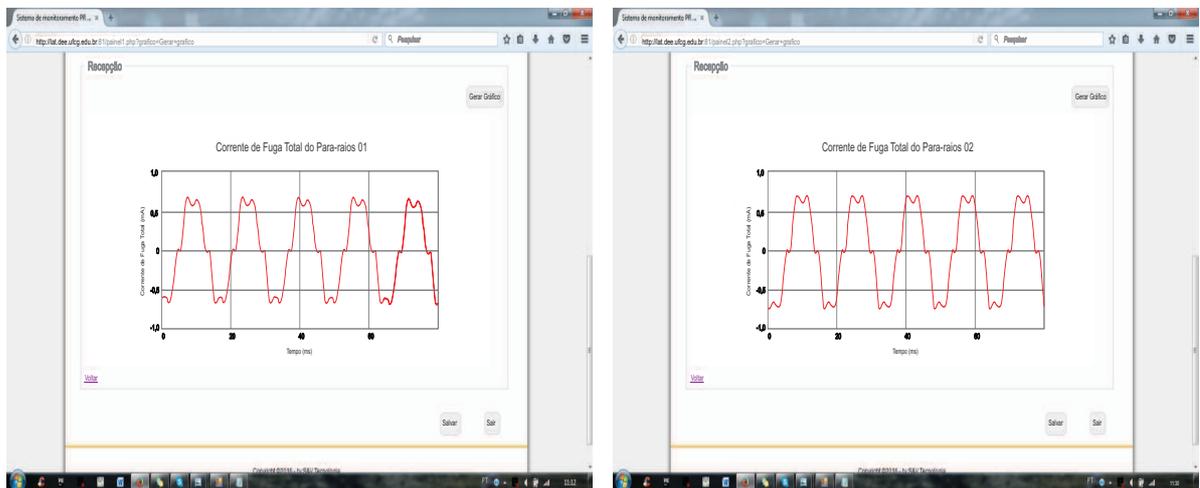
Fonte: (Próprio Autor).

O gráfico gerado na página *web* é apresentado na Figura 33 (a) e (b).

Figura 33 – (a) Para-raios PR-01. (b) Para-raios PR-02.

(a)

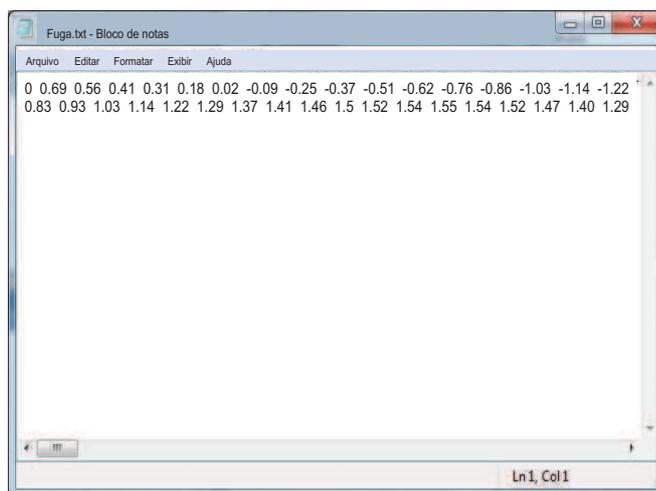
(b)



Fonte: (Próprio Autor).

Além da geração do gráfico, a página conta ainda com a opção "Salvar", permitindo que o usuário salve os pontos referentes à formação do gráfico em arquivo de extensão .txt, sendo pré-estabelecido o diretório, conforme mostra a Figura 34.

Figura 34 – Pontos da corrente de fuga total em arquivo txt.



Fonte: (Próprio Autor).

## 4.7 Ensaios e Medições

Para o desenvolvimento e teste da metodologia proposta foram realizados, em laboratório, ensaios de aplicação da Máxima Tensão de Operação Contínua (MCOV) em dois para-raios, PR-01 e PR-02 (Figura 35). A partir destes ensaios foi possível obter sinais de corrente de fuga que percorrem o para-raios de ZnO.

Figura 35 – Fotografia dos para-raios PR-01 e PR-02.



Fonte: (Próprio Autor).

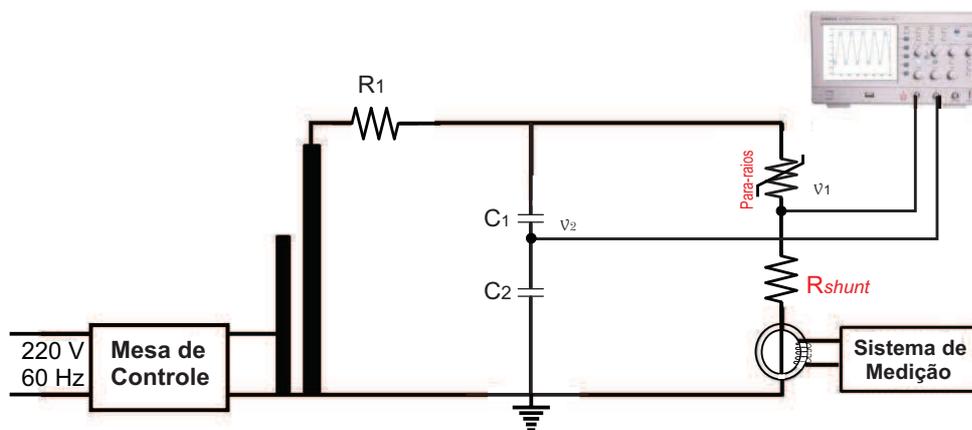
O diagrama do arranjo experimental usado neste ensaio é mostrado na Figura 36.

O arranjo experimental utilizado é composto de uma fonte de tensão senoidal regulável (tensão de 0 a 220 V), um transformador elevador de tensão (tensão de 0 a 100 kV), uma resistência de proteção R (282 k $\Omega$ ), um divisor tensão capacitivo em paralelo com o sistema, o objeto de teste (Para-raios de ZnO) e uma resistência *shunt* ( $R_{shunt}$ ) de 1 k $\Omega$ .

A fonte de tensão utilizada atende aos requisitos da norma para ensaios em alta tensão, a qual determina que a distorção máxima da fonte corresponde a razão entre os valores de pico e RMS da tensão, devendo ser aproximadamente igual  $\sqrt{2}$  com tolerância de  $\pm 5\%$ . Com isso, minimiza-se o efeito da inserção de componentes harmônicos externos nas medições (LIRA, 2012).

Os sinais de tensão e corrente no varistor são adquiridos por meio de um divisor capacitivo (relação de 1917,6 para 1) e uma resistência *shunt* ( $R_{shunt}$ ), respectivamente, em conjunto com o sistema de monitoramento da corrente de fuga total, formado essencialmente por pontas de prova e um osciloscópio digital. Os sinais de corrente medidos e obtidos são, então, armazenados em um computador para tratamento posterior.

Figura 36 – Arranjo experimental utilizado para os ensaios.



Fonte: (Próprio Autor).

Estes ensaios foram realizados com o auxílio do Kit de Alta Tensão existente no Laboratório de Alta Tensão (LAT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Fotografias do Kit de Alta Tensão com o arranjo experimental e da sua mesa de controle utilizado nos ensaios são mostradas na Figura 37.

Figura 37 – Fotografia do arranjo experimental utilizado para os ensaios.



Fonte: (Próprio Autor).

#### 4.7.1 Amostras Ensaçadas

Nos ensaios de aplicação da MCOV para determinação da corrente de fuga em para-raios foram utilizados dois para-raios do tipo estação com tensão nominal de 72 kV e MCOV de 58 kV para PR-01, já para o PR-02 tem-se uma tensão nominal de 72 kV e MCOV 42 kV.

O objetivo de se ter mais de uma amostra de para-raios é avaliar a funcionalidade do sistema de monitoramento quando demandado o acompanhamento da corrente de fuga total para diversos para-raios.

## 5 RESULTADOS E ANÁLISES

Este capítulo tratará dos resultados obtidos em laboratório, bem como as análises a respeito dos ensaios.

No primeiro momento, serão apresentados os resultados obtidos a partir da variação da amplitude da corrente e frequência no circuito, a fim de verificar sua resposta em frequência.

Em sequência serão apresentados os resultados obtidos do sistema de monitoramento, comparando os sinais obtidos pelo sistema com os do resistor *shunt*. A partir daí verificar o quão próximo a forma de onda da corrente de fuga presente no *shunt* está do sinal lido pelo sistema de monitoramento. Por fim, é apresentada a versão final do protótipo do sistema de monitoramento.

### 5.1 Resposta em Frequência do Sistema de Monitoramento

Devido a característica não linear do para-raios de ZnO sua corrente de fuga é composta por componentes harmônicas significativas.

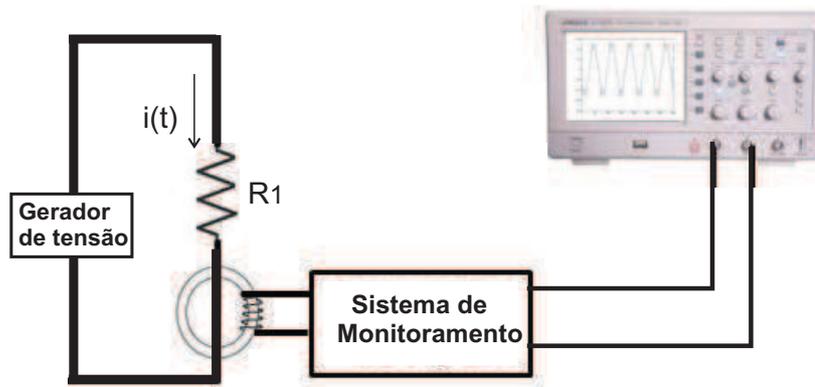
Vários estudos reportam que a corrente de fuga total do para-raios pode ser decomposta em suas componentes harmônicas ímpares (SHIRAKAWA et al., 1988); (LUNDQUIST et al., 1990), ou seja, na soma da 1ª, 3ª, 5ª, 7ª, 9ª, ...n-ésima componentes harmônicas do sinal. Após a análise de trabalhos anteriores e de resultados obtidos em laboratório, constatou-se que os sinais de corrente de fuga total poderiam ser representados com boa exatidão por meio do somatório das suas cinco primeiras harmônicas ímpares. Portanto, o sensor de corrente deve responder de forma satisfatória para essas componentes harmônicas.

Visando escolher um ganho do amplificador de instrumentação que proporcione boa resposta de amplitude e frequências características da corrente de fuga do para-raios de ZnO, foi realizado um experimento em que a amplitude e a frequência de um sinal senoidal foram variadas. Vale ressaltar que a resposta obtida é do circuito como um todo e não apenas do núcleo toroidal.

A Figura 38 apresenta o diagrama elétrico do ensaio realizado no LEASE.

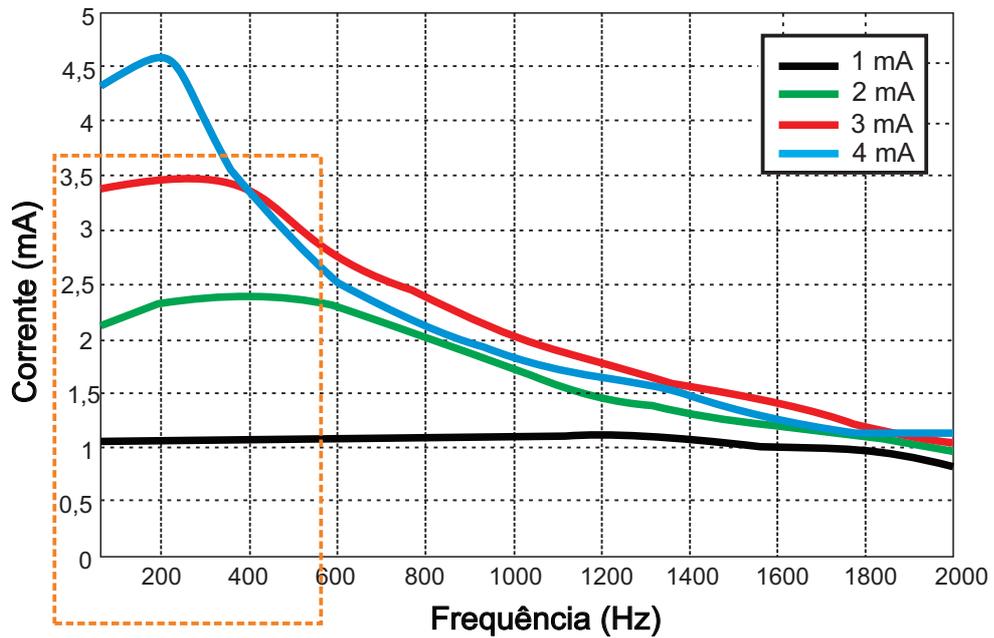
Na Figura 39 pode ser visualizada a resposta em amplitude e frequência do circuito elétrico.

Figura 38 – Diagrama elétrico do ensaio realizado.



Fonte: (Próprio Autor).

Figura 39 – Resposta em amplitude e frequência do sensor de corrente.



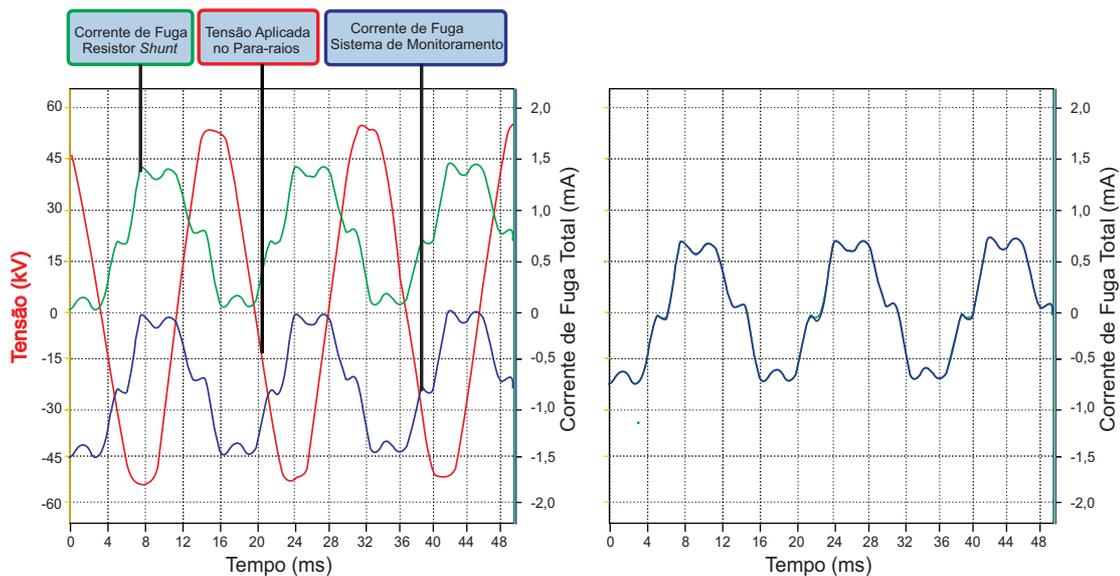
Fonte: (Próprio Autor).

Percebe-se na área destacada (na cor **laranja**) que a resposta em frequência é satisfatória até correntes de fuga total da ordem de 3,5 mA, não comprometendo suas principais componentes harmônicas que são as cinco primeiras ímpares.

## 5.2 Sistema de Monitoramento da Corrente de Fuga Total

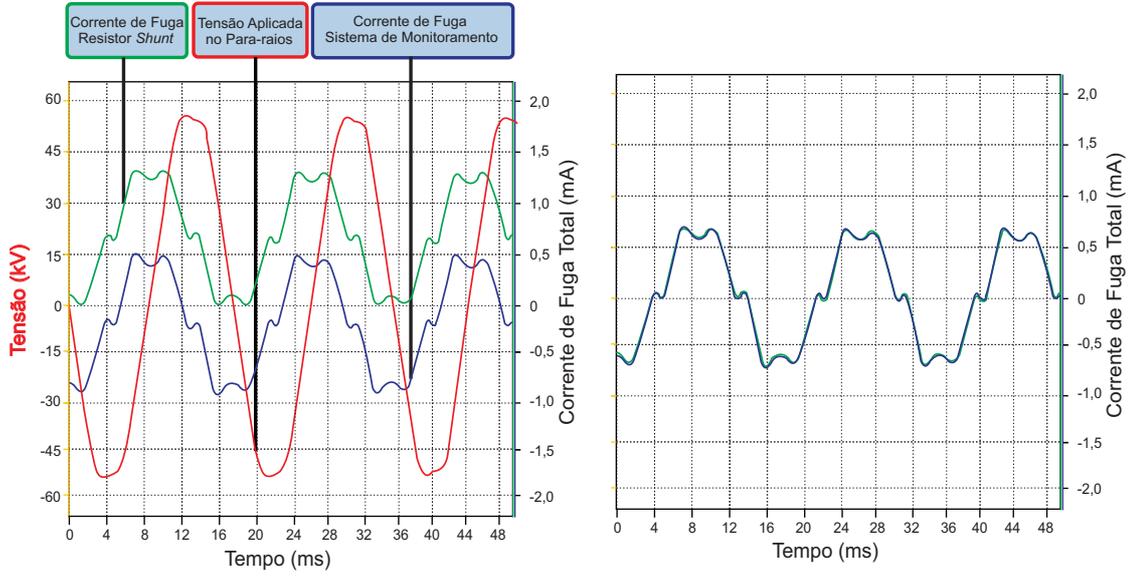
Após os ajustes necessários, de forma a se ter uma tensão de saída proporcional a corrente, com relação de transformação 1 V/1 mA e resposta de amplitude e frequência satisfatória, a etapa seguinte foi validar o sistema de monitoramento por meio da medição da corrente de fuga dos para-raios PR-01 e PR-02. Para isso, os para-raios foram submetidos à tensão de operação contínua, a uma temperatura de 27,4° C e umidade de 60% e a corrente de fuga foi medida, simultaneamente utilizando o resistor *shunt* e o sistema de monitoramento desenvolvido. Nas Figuras 40 e 41 são apresentadas as formas de onda dos sinais de tensão e corrente de fuga aplicados e obtidos durante o teste de validação. Pode-se observar a forma de onda da tensão aplicada (na cor **vermelha**) e os sinais de corrente obtidos por meio do resistor *shunt* (na cor **verde**) e pelo sistema de monitoramento (na cor **azul**). Na Figura da direita, os sinais de corrente obtidos são sobrepostos com a finalidade de mostrar a concordância dos resultados fornecidos pelo método convencional (medição de corrente por meio do resistor *shunt*) e o proposto.

Figura 40 – Formas de onda da tensão do sistema e correntes de fuga no para-raios PR-01.



Fonte: (Próprio Autor).

Figura 41 – Formas de onda da tensão do sistema e correntes de fuga no para-raios PR-02.



Fonte: (Próprio Autor).

Para análise mais precisa e confiável, foi feito o cálculo do coeficiente de determinação  $R^2$ . Esse coeficiente de determinação  $R^2$  indica o quão próximo à forma de onda da corrente de fuga lida sobre o *shunt* está da lida pelo sistema de monitoramento desenvolvido. Ele é definido como sendo um menos a razão entre a soma quadrática dos erros entre sinais medidos e calculados (SSE) e a soma dos erros quadráticos com relação à média dos dados medidos (SST), de acordo com as equações a seguir (SPIEGEL; SCHILLER; SRINIVASAN, 2001).

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}, \quad (5.1)$$

$$SSE = \sum_{j=1}^m [v_m(j) - v_l(j)]^2, \quad (5.2)$$

$$SST = \sum_{j=1}^m [v_m(j) - \bar{v}_m(j)]^2. \quad (5.3)$$

Em que  $v_m(j)$  e  $v_l(j)$  são respectivamente os valores medidos e calculados,  $m$  é o número de amostras e  $\bar{v}_m(j)$  é o valor médio do sinal medido. Quanto mais próximo de um (1) for  $R^2$  mais correlacionados estão os sinais.

Foram obtidos os seguintes valores do  $R^2 = 0,9930$  para o para-raios PR-01 e  $R^2 = 0,9911$  para o para-raios PR-02. Dessa forma, os resultados mostram a viabilidade e a confiabilidade do sistema de monitoramento baseado na corrente de fuga total do para-raios de ZnO.

### 5.3 Protótipo do Sistema de Monitoramento

É apresentada na Figura 42 a versão final do protótipo do sistema de monitoramento remoto de para-raios de ZnO baseado na medição da corrente de fuga total.

O equipamento desenvolvido apresenta no seu **painel frontal** uma tela de cristal líquido, a fim de realizar o monitoramento localmente, assim como, visualizar data, hora, temperatura e umidade. A sinalização luminosa, indica o estado de operação do sistema (leitura, impressão e envio de dados). Na **lateral esquerda** está a antena de comunicação *xbee*. A **lateral direita** foi reservada para alocação da chave liga/desliga. Na parte **inferior**, estão posicionados entrada de dados auxiliares, fusível de proteção contra sobretensões e alimentação de energia elétrica para o circuito. As extremidades superior e inferior são destinadas a fixação das buchas de conexão ligando o para-raios ao aterramento.

Figura 42 – Fotografia do Suporte Metálico do Sistema de Monitoramento.



Fonte: (Próprio Autor).

É apresentado na Figura 43 o sistema de monitoramento completo, ou seja, além do sistema microcontrolado de medição de corrente de fuga, tem-se um computador utilizado na recepção das informações, carregando-as em um banco de dados que podem ser acessadas de qualquer lugar, desde que se tenha *internet*. O equipamento desenvolvido mostrou-se robusto, prático, confiável, além de ser portátil.

Figura 43 – Fotografia do Sistema de Monitoramento.



Fonte: (Próprio Autor).

## 6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado o desenvolvimento de um sistema eletrônico capaz de realizar o monitoramento remoto do nível de degradação de para-raios de ZnO a partir da sua corrente de fuga total, enviando-a para uma sala de comando da subestação por meio de uma rede de sensores sem fio.

O sistema baseou-se na medição, condicionamento, processamento e envio sem fio do sinal da corrente de fuga total do para-raios.

O sistema foi desenvolvido e validado no Laboratório de Eletrônica Aplicada a Sistemas Elétricos (LEASE) e no Laboratório de Alta Tensão (LAT).

Foram realizadas medições de corrente de fuga total no kit de alta tensão do LAT.

Notou-se que os resultados apresentados pelo sistema de monitoramento obtiveram alta similaridade com a corrente de fuga total utilizando o resistor *shunt*, sendo ratificado a partir da determinação do coeficiente  $R^2$ .

Com base nos resultados e considerações mencionados anteriormente, é possível observar o grau de fidelidade com que o sensor de corrente desenvolvido opera, concluindo-se, portanto, que o seu uso pode ser efetivado com confiabilidade e garantia de eficiência na aquisição da corrente de fuga total em para-raios de ZnO.

Diante do exposto, pode-se concluir que os objetivos de uma pesquisa em nível de graduação foram alcançados.

Como continuação do estudo aqui realizado, propõe-se:

- Aperfeiçoar a página *web*.
- Otimizar o banco de dados e aplicar técnicas no diagnóstico do nível de degradação do para-raios.
- Estudo e Desenvolvimento de uma fonte de alimentação alternativa independente do sistema elétrico da subestação, tendo como sugestão a utilização da geração de energia elétrica a partir de células fotovoltaicas.
- Estudo e aplicação de núcleos com melhor resposta em frequência, a fim de submeter o sistema a impulsos de corrente.
- Emprego de um sensor de corrente não invasivo (núcleo bipartido).

# REFERÊNCIAS

- ABB. *High Voltage Surge Arresters*. [S.l.: s.n.], 2016. Citado na página 22.
- BACEGA, W. R.; KANASHIRO, A. G.; TATIZAWA, H.; JUNIOR, M. Z.; OBASE, P. F. Diagnóstico do estado dos pára-raios em operação no sistema de transmissão. *ANAIS DO V CITENEL - CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENGENHARIA ELÉTRICA*. Belém, Brasil, 2009a, 2009. Citado na página 18.
- BACEGA, W. R.; TATIZAWA, H.; KANASHIRO, A. G. Técnica de identificação do processo de degradação de pára-raios de zno em campo. *XX SNPTEE, Recife*, 2009. Citado na página 18.
- BATISTA, T. C. *Transformador de Corrente com Núcleo de Liga Nanocristalina para Medição*. Dissertação de Mestrado — Universidade Federal de Campina Grande, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 42.
- BATISTA, W. A. S. *Sistema de Monitoramento Online de Para-raios de ZnO com Base na Medição da Corrente de Fuga*. Trabalho de Conclusão de Curso — Universidade Federal de Campina Grande, 2015. Citado 4 vezes nas páginas 16, 43, 44 e 52.
- BATISTA, W. A. S.; LOPES, S. C. B.; LIRA, G. R. S. Online monitoring system of zno surge arresters based on the measured leakage current. *The 19th International Symposium on High Voltage Engineering, 2015, Pilsen, Czech Republic. International Symposium on High Voltage Engineering*, 2015. Citado na página 44.
- BRAGA, N. C. *Como Fazer uma Placa de Circuito Impresso*. [S.l.: s.n.], 2014. Citado na página 77.
- BRITO, V. S. *Modelo de Pararraios de Óxido de Zinco para Estudos de Sobretensões em Sistemas de Potência*. Relatório Técnico (Ano 1) de Projeto e Pesquisa — Universidade Federal de Campina Grande, 2013. Citado na página 23.
- BRITO, V. S. *Sistema de Monitoramento da Corrente de Fuga em Para-Raios de Óxido de Zinco*. Relatório de Projeto e Pesquisa Submetido à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica — Universidade Federal de Campina Grande, 2013. Citado 6 vezes nas páginas 27, 34, 36, 37, 38 e 44.
- CARLSON, W.; GUPTA, T.; SWEETANA, A. A procedure for estimating the lifetime of gapless metal oxide surge arresters for ac application. *IEEE transactions on power delivery*, IEEE, v. 1, n. 2, p. 67–74, 1986. Citado na página 18.
- COSTA, E. G. *Análise de Desempenho de Para-raios e Óxido de Zinco*. Tese de Doutorado — Universidade Federal de Campina Grande, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 29.
- FERNANDO, S. N. Effect of valve element characteristics, stray capacitance and voltage harmonics on surge arrester diagnostics. 2001. Citado na página 28.
- FRANCO, J. Curso sobre para-raios: Aplicação em redes de distribuição, subestações e linhas de transmissão. *Franco Engenharia, São Paulo*, v. 174, 2001. Citado na página 24.

- GUANABARA, G. *Curso em vídeo de php e mysql*. [S.l.], (acessado em 10/01/2016). Disponível em: <<https://www.cursoemvideo.com/>>. Nenhuma citação no texto.
- GUPTA, T. K. Application of zinc oxide varistors. *Journal of the American Ceramic Society*, Wiley Online Library, v. 73, n. 7, p. 1817–1840, 1990. Citado na página 29.
- HADDAD, A.; FUENTES-ROSADO, J.; GERMAN, D.; WATERS, R. Characterisation of zno surge arrester elements with direct and power frequency voltages. *IEE Proceedings A (Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education)*, IET, v. 137, n. 5, p. 269–279, 1990. Citado na página 25.
- HEINRICH, C.; HINRICHSEN, V. Diagnostics and monitoring of metal-oxide surge arresters in high-voltage networks-comparison of existing and newly developed procedures. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 16, n. 1, p. 138–143, 2001. Citado 3 vezes nas páginas 17, 22 e 29.
- IEC-60009-5. *Surge Arresters - Selection and Application Recommendations*. [S.l.: s.n.], 2000. Citado 3 vezes nas páginas 17, 24 e 26.
- IEC-60099-4. *Surge Arresters—Part 4: Metal-oxide Surge Arresters Without Gaps for A.C. Systems*. [S.l.: s.n.], 2001. Citado na página 18.
- KIL, G. S.; HAN, J. S.; LEE, J. H.; KIM, J. B.; CHO, H. G. Influence of the third harmonic component in power system voltage on arresters diagnostics. *Proceedings of The 13th International Symposium on High Voltage Engineering, Delft, Netherlands*, 2003. Citado na página 26.
- LEVINSON, L. M.; PHILIPP, H. The physics of metal oxide varistors. *Journal of Applied Physics*, AIP, v. 46, n. 3, p. 1332–1341, 1975. Citado na página 29.
- LINDE, F. van der; SWIFT, D. The modelling and harmonic content of the resistive component of current in zno varistors. In: IET. *High Voltage Engineering, 1999. Eleventh International Symposium on (Conf. Publ. No. 467)*. [S.l.], 1999. v. 2, p. 258–261. Citado na página 26.
- LIRA, G. R. S. *Monitoramento da corrente de fuga em para-raios de óxido de zinco com base na medição da corrente de fuga total*. Tese de Doutorado — Universidade Federal de Campina Grande, 2012. Citado 6 vezes nas páginas 17, 23, 25, 34, 36 e 59.
- LIRA, G. R. S.; BRITO, V. S.; COSTA, E. G. Monitoramento de para-raios de zno a partir da corrente de fuga total. *Décimo Quinto Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ*, Foz do Iguaçu, 2013. Citado na página 29.
- LIRA, J. G. A. *Sistema de aquisição de dados para monitoramento e diagnóstico remoto das condições de para-raios de óxido de zinco*. Tese de Doutorado — Universidade Federal de Campina Grande, 2007. Citado 13 vezes nas páginas 16, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 36, 37, 38, 40, 42 e 52.
- LOPES, S. C. B.; LIRA, G. R. S.; NASCIMENTO, V. R. B. do; BARBOSA, L. A. Sistema de monitoramento online de para-raios de óxi-do de zinco baseado na medição da corrente de fuga. *ANAIS DO VI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS. Natal, Brasil*, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 44.

- LUNDQUIST, J.; STENSTROM, L.; SCHEI, A.; HANSEN, B. New method for measurement of the resistive leakage currents of metal-oxide surge arresters in service. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 5, n. 4, p. 1811–1822, 1990. Citado na página 61.
- MACÊDO, E. C. T. *Sistema de avaliação do nível de degradação de para-raios de óxido de zinco*. Dissertação de Mestrado — Universidade Federal de Campina Grande, 2010. Citado 6 vezes nas páginas 28, 33, 36, 37, 38 e 40.
- MACÊDO, F. *Componentes eletrônicos*. [S.l.], (acessado em 21/01/2017). Disponível em: <<http://www.filipeflop.com>>. Nenhuma citação no texto.
- MUSSOI, F. L. R. Filtros passivos. *Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina (CEFET/SC)*, 2ed, 2004. Citado na página 46.
- NASCIMENTO, V. R. B.; LOPES, S. C. B. Redes de sensores sem fio empregadas no monitoramento de para-raios de zno. *5º Encontro do Grupo de Sistemas Elétricos – UFCG*, 2016. Citado na página 51.
- NOGUEIRA, M. C.; PEZZI, D. d. C. A computação agora é nas nuvens. *Trabalho apresentado no curso de Ciência da Computação–UNICRUZ Cruz Alta, RS–Brasil*, 2009. Citado na página 56.
- OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. Digital signal processing. *USA edition: Prentice Hall*, 1975. Citado na página 49.
- PHP. *Hypertext Preprocesso*. [S.l.], (acessado em 15/06/2016). Disponível em: <<https://secure.php.net/>>. Nenhuma citação no texto.
- REBOUÇAS, P. P. F. Microcontroladores pic: Linguagem c utilizando ccs para leigos. *Editora IFCE*, 2013. Citado na página 74.
- SHIRAKAWA, S.; ENDO, F.; KITAJIMA, H.; KOBAYASHI, S.; GOTO, K.; SAKAI, M. Maintenance of surge arrester by a portable arrester leakage current detector. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 3, n. 3, p. 998–1003, 1988. Citado na página 61.
- SPIEGEL, M.; SCHILLER, J.; SRINIVASAN, R. *Probabilidad y Estadística. Segunda edición*. Ed. [S.l.]: Mc Graw Hill Latinoamericana SA. Bogotá, Colombia, 2001. Citado na página 64.
- TAURION, C. Cloud computing: computação em nuvem: transformando o mundo da tecnologia da informação. *Rio de Janeiro: Brasport*, v. 2, n. 2, p. 2–2, 2009. Citado na página 56.
- TEXAS-INSTRUMENTS. *Folha de dados do Amplificador de instrumentação de precisão INA 114*. [S.l.: s.n.], 2015. Citado na página 44.
- URSINE, W. A. M. *Monitoramento Autônomo de Para-Raios de ZnO*. Dissertação de Mestrado — Universidade Federal de Minas Gerais, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 23.
- WANDERLEY NETO, E. T. Monitoramento e diagnóstico de pára-raios a zno através de redes neurais artificiais. *Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Elétrica Universidade Federal de Campina Grande*, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.

WENDLING, M. Amplificadores operacionais. *Universidade Estadual Paulista(Unesp)*, v. 2.0, 2010. Citado na página 46.

YOSHIZAWA, Y. Magnetic properties and applications of nanostructured soft magnetic materials. *Scripta materialia*, Pergamon, v. 44, n. 8, p. 1321–1325, 2001. Nenhuma citação no texto.

ZANOTTI, J. M. *Contribuição à metodologia de avaliação dos pára-raios do sistema de transmissão de energia elétrica*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2009. Citado na página 27.

ZHU, H.; RAGHUVVEER, M. Influence of harmonics in system voltage on metal oxide surge arrester diagnostics. In: IEEE. *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1999 Annual Report Conference on*. [S.l.], 1999. v. 2, p. 542–545. Citado na página 26.

ZIGBEE. *Zigbee Alliance*. [S.l.], (acessado em 21/01/2015). Disponível em: <<http://www.zigbee.org/>>. Nenhuma citação no texto.

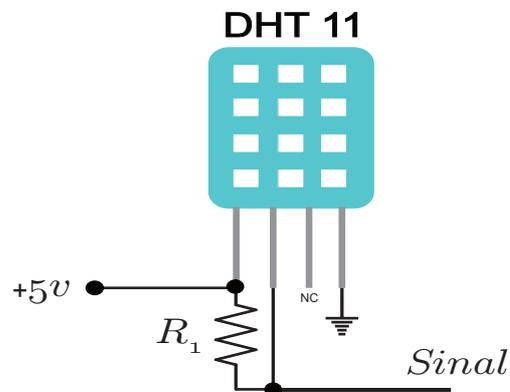
# Anexos

## ANEXO A – SENSOR DHT 11

Medição e controle de temperatura e umidade relativa do ar encontram aplicações em diversas áreas. Estes dispositivos têm ambos os sensores de temperatura e umidade com sinal condicionado, ADC, calibração e interface de comunicação todos construídos dentro deles. O uso de tais sensores inteligentes simplifica grandemente a concepção e reduz o custo global. O sensor DHT 11 oferece saídas digitais calibrado para temperatura e umidade, mas é relativamente mais barato do que outros do mercado. O sensor DHT 11 usa um protocolo de *1-wire* proprietário que pode ser implementado com qualquer microcontrolador PIC, que receberá os valores de temperatura e umidade do sensor. Este sensor vem em um pacote de quatro pinos única linha e opera a partir de 3,5 a 5,5 v. Pode medir a temperatura 0 - 50° C com uma precisão de  $\pm 2^\circ$  C e umidade relativa variando 20 - 95% com uma precisão de  $\pm 5\%$ . O sensor fornece totalmente calibrado saídas digitais para as duas medições.

É possível visualizar na Figura 44 o sensor de temperatura e umidade DHT 11.

Figura 44 – Sensor de temperatura e umidade DHT 11.



Fonte: (Próprio Autor).

## B MICROCONTROLADOR PIC

Um Microcontrolador é um sistema computacional completo inserido em um único circuito integrado. Possui CPU, memória de dados RAM (*Random Access Memory*) e programa ROM (*Read Only Memory*) para manipulação de dados e armazenamento de instruções, sistema de *clock* para dar sequência às atividades da CPU, portas de I/O além de outros possíveis periféricos como, módulos de temporização, conversores A/D.

O tipo de memória e a capacidade de armazenamento são aspectos importantes na escolha de um microcontrolador. Os microcontroladores da família PIC são fabricados com memória *Electrical Erasable Programmable Read Only Memory* (EEPROM), cuja capacidade interna é de 256 *bytes* de memória. A característica desse tipo de memória é que os dados armazenados no microcontrolador são conservados diante da ação de inicializá-lo (REBOUÇAS, 2013).

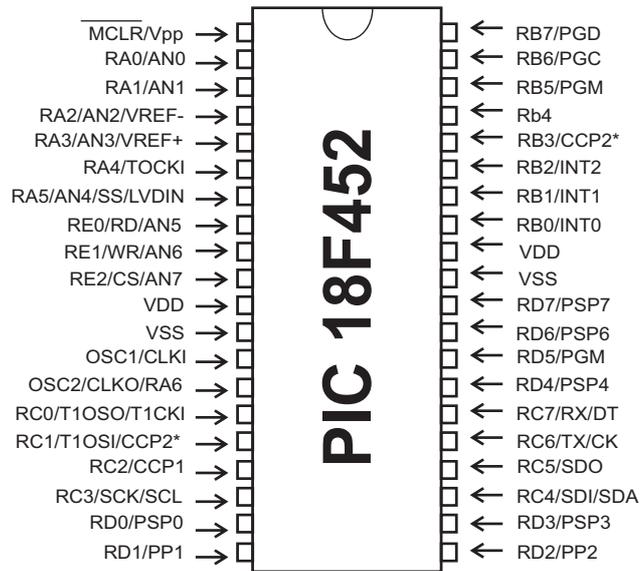
O microcontrolador PIC18F452 foi escolhido porque além de possuir conversor analógico-digital interno de 10 *bits*, possibilita taxas de amostragens compatíveis com as exigidas para a aplicação desejada, além de possuir tempo de execução adequado para a realização das tarefas de gerenciamento e de processamento. A grande vantagem desse microcontrolador é a de possuir memória *Flash*, possibilitando assim escrever/apagar com grande rapidez.

Principais características:

- 40 pinos podendo ter até 34 I/O (*Input/Output* digital);
- 8 canais A/D de 10 *Bits*;
- 02 Módulos CCP – *capture, compare e PWM*;
- Memória de Programa *Flash* – 32K;
- Memória RAM – 1536 *bytes*;
- Memória EEPROM – 256 *bytes*;
- Velocidade de processamento – até 10 *MIPS* (milhões de instruções por segundo);
- Módulo USART;
- Possibilita interrupção externa através de pinos do microcontrolador;
- Possibilita até 100.000 ciclos de escrita/leitura na memória de programa.

A Figura 45 apresenta o diagrama de pinos do microcontrolador PIC utilizado.

Figura 45 – Diagrama de pinos e fotografia do PIC 18F452.



Fonte: (Próprio Autor).

# Apêndices

# APÊNDICE A – CONFECÇÃO DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO

A finalidade de uma placa de circuito impresso é tripla: ao mesmo tempo ela sustenta os componentes em posição de funcionamento, fornece os percursos para as correntes que eles exigem para operação e evita mau contato entre componentes.

Esses percursos são conseguidos por uma camada de cobre que deve ser recortada de modo a formar trilhas que vão funcionar como fios.

Assim, sobre uma placa de fenolite ou fibra (que é um material isolante) tem-se depositada uma finíssima camada de cobre que deve ser corroída de modo a formar as linhas que vão ligar os componentes.

Colocados nestas placas, os componentes tem seus terminais encaixados em furos e depois soldados nestas trilhas de cobre.

Desta forma, num trabalho de elaboração de uma placa para um projeto, o montador deve partir de uma placa virgem, ou seja, uma placa que tenha toda sua superfície cobreada.

Depois deve transferir para essa placa o desenho de como devem ficar as ligações entre os componentes para o projeto que deseja montar.

Uma vez que se obtenha o desenho da placa, ou seja, como devem ficar as trilhas de cobre para o aparelho desejado, será preciso fazer a gravação, ou seja, "corroer" os locais em que o cobre vai ser retirado.

Para isso, existem várias técnicas, sendo a mais comum a que faz uso de uma tinta especial à prova de corrosivo. Para confecção da PCI foi utilizado o método de banho por corrosão. Coloca-se então a placa numa banheira de plástico que contém a solução para placa de circuito impresso que é obtida dissolvendo-se percloro de ferro (O nome correto da substância é cloreto de ferro II) em água (a proporção é de um para um).

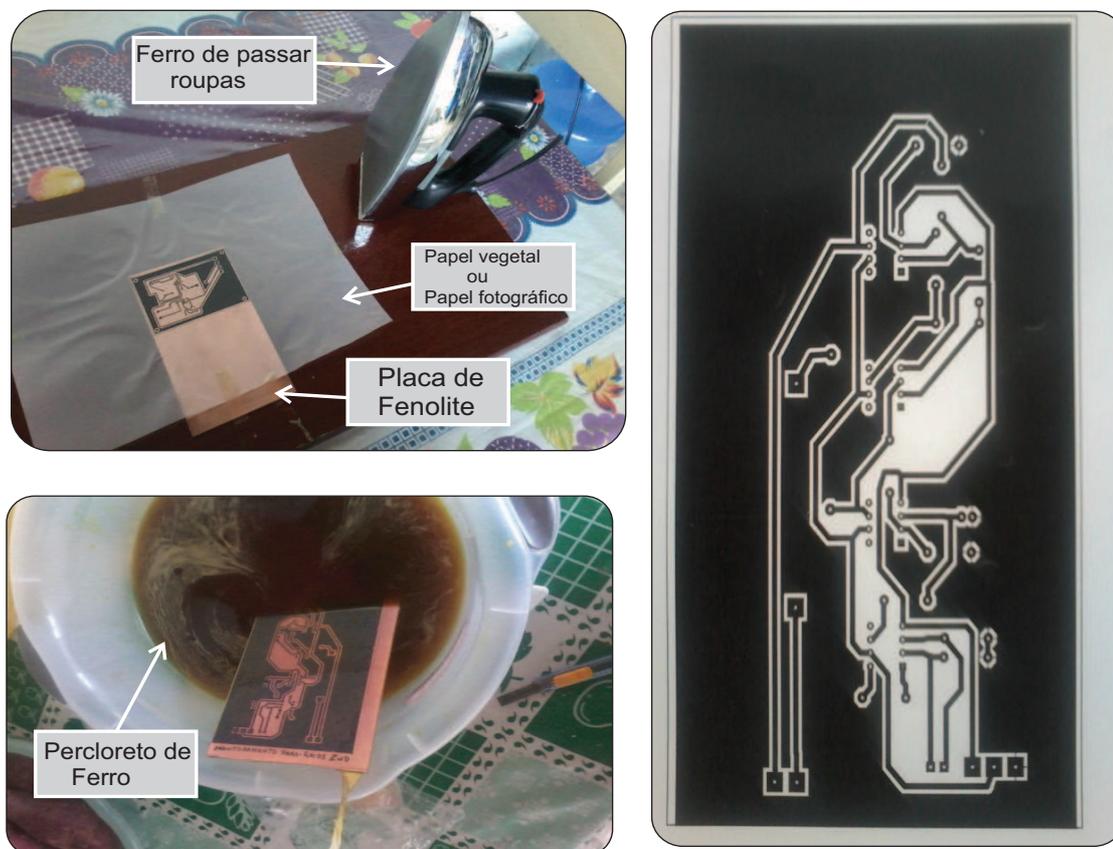
Nesse processo o percloro libera muito calor e vapores que devem ser evitados. A solução de percloro mancha com facilidade e ataca objetos de metal.

Após cerca de 5 minutos, lave-a com água comum e depois com um algodão embebido em álcool ou outro solvente remova a tinta das regiões cobertas. As trilhas de cobre devem aparecer.

O próximo passo ser fazer os furos para encaixar os componentes e o processo de soldagem (BRAGA, 2014).

Na Figura 46 é possível observar a fotografia dos materiais utilizados.

Figura 46 – Fotografia da confecção da PCI.



Fonte: (Próprio Autor).

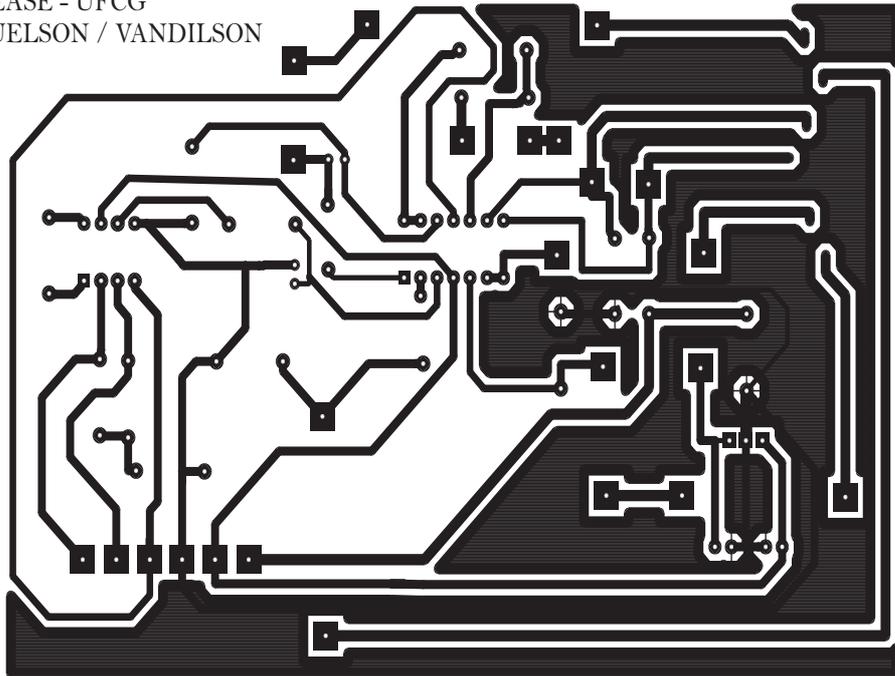
# APÊNDICE B – LAYOUT DAS PCIS

## B.1 PCI das Unidades de Entrada e Condicionamento

Figura 47 – Layout da PCI das unidades de entrada e condicionamento.

LEASE - UFCG

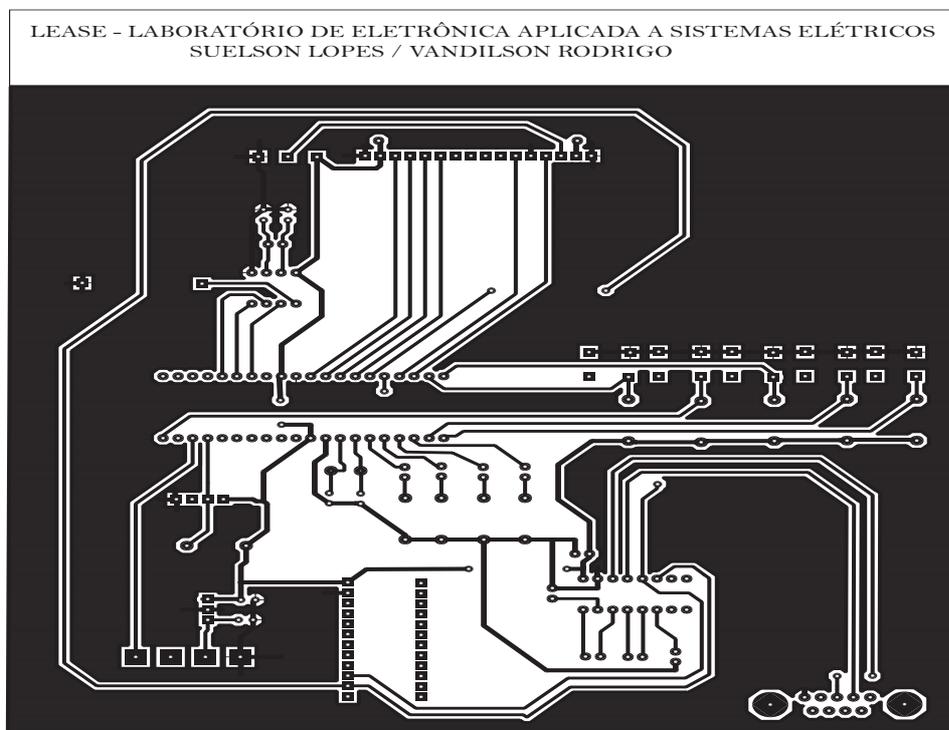
SUELSON / VANDILSON



Fonte: (Próprio Autor).

## B.2 PCI da Unidade de Processamento

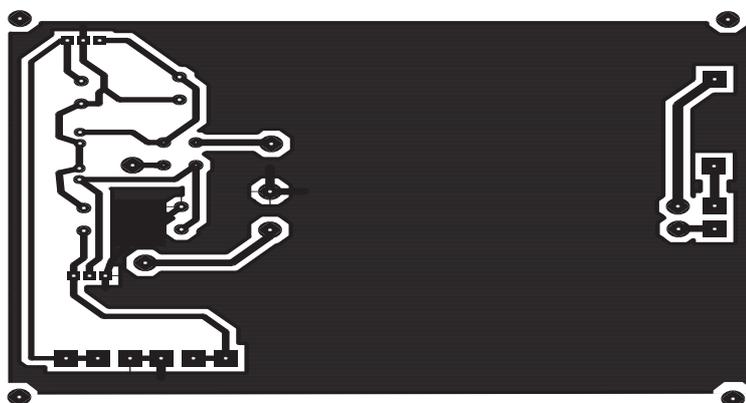
Figura 48 – Layout da PCI das unidade de processamento.



Fonte: (Próprio Autor).

## B.3 PCI da Fonte de Alimentação Simétrica CC

Figura 49 – Layout da PCI da fonte de alimentação.



Fonte: (Próprio Autor).

# APÊNDICE C – TRABALHOS PUBLICADOS

Neste apêndice consta os artigos gerados, publicados e em submissão nos congressos e encontros a partir do presente trabalho de conclusão de curso.

## SUBMETIDOS

LOPES, S. C. B.; LIRA, G. R. S.; NASCIMENTO, V. R.; BARBOSA, L. A. *Sistema de Monitoramento Online de Para-raios de Óxido de Zinco Baseado na Medição da Corrente de Fuga*. In: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2016, Natal. Anais do VI Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2016.

LOPES, S. C. B.; NASCIMENTO, V. R. *Sistema de Monitoramento Online de Para raios de óxido de zinco baseado na medição da corrente de fuga total* (5º Encontro do Grupo de Sistemas Elétricos – UFCG), 2016.

BATISTA, W. A. S.; LOPES, S. C. B.; LIRA, G. R. S. *Online monitoring sytem of zno surge arresters based on the measured leakage current. The 19th International Symposium on High Voltage Engeneering, 2015. Pilsen, Czech Republic.*

BATISTA, W. A. S.; LOPES, S. C. B. *Sistema de Monitoramento de Para raios ZnO baseado na corrente de fuga total* (4º Encontro do Grupo de Sistemas Elétricos – UFCG-2014).

## EM SUBMISSÃO

LIRA, G.R.S.D.; FILHO, C. R. C. D.; BARBOSA, V. R. D. N.; SOUZA, L. S. D.; BATISTA, S. L. D. C. *Online monitoring sytem of zno surge arresters based on the measured leakage current . In: The 20th International Symposium on High Voltage Engineering, 2017, Buenos Aires, Argentina.*

S. L. C. BATISTA; G. R. S. LIRA; V. R. N. BARBOSA; L. A. BARBOSA. *Sistema de Monitoramento Remoto de Para-raios de Óxido de Zinco Baseado na Medição da Corrente de Fuga Total*. In: XVII Encontro Regional Iberoamericano de Cigré (Ciudade del Este, Paraguai, 21 a 25 de Maio de 2017), 2017.

LIRA, G. R. S. D.; AMORIM FILHO, C. R. C. D.; BARBOSA, V. R. D. N.; SOUZA, L. S. D.; BATISTA, S. L. D. C.; COSTA, E. G. D.; MAIA, M. J. D. A. *Sistema de Monitoramento Remoto Baseado na Medição da Corrente de Fuga em Para-raios de ZnO*. XXIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, XXIV SNPTEE, Curitiba, Brasil, 22 a 25 de Outubro de 2017.