



**Universidade Federal de Campina Grande**

**Centro de Engenharia Elétrica e Informática**

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

WELLINGTON ANTÔNIO BATISTA DA SILVA

**SISTEMA DE MONITORAMENTO ONLINE DE PARA-RAIOS  
DE ZNO COM BASE NA MEDIÇÃO DA CORRENTE DE FUGA**

Campina Grande, Paraíba  
Dezembro de 2015

WELLINGTON ANTÔNIO BATISTA DA SILVA

SISTEMA DE MONITORAMENTO ONLINE DE PARA-RAIOS  
DE ZNO COM BASE NA MEDIÇÃO DA CORRENTE DE FUGA

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

Área de Concentração: Proteção de Equipamentos Elétricos

Orientador:

George Rossany Soares de Lira, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba  
Dezembro de 2015

WELLINGTON ANTÔNIO BATISTA DA SILVA

# SISTEMA DE MONITORAMENTO ONLINE DE PARA-RAIOS DE ZNO COM BASE NA MEDIÇÃO DA CORRENTE DE FUGA

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

Área de Concentração: Proteção de Equipamentos Elétricos

Aprovado em        /        /

---

**Professor Avaliador**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

---

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

Campina Grande, Paraíba  
Dezembro de 2015

Dedico este trabalho à minha família, em especial à minha mãe que sempre me encorajou a continuar, mesmo quando nem eu mesmo acreditava que conseguiria terminar este curso, fiel, dedicada, corajosa e exemplar.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, por ser essencial em minha vida, autor de meu destino, meu guia, socorro presente na hora da angústia, pois sem Ele eu não teria forças para essa longa jornada. Pelo dom da vida me dado e por ter me ajudado sempre em minha vida me ensinando e me guardando sempre.

Agradeço aos que fazem o Laboratório de Alta Tensão e aos professores e amigos que me possibilitaram os ensaios para o desenvolvimento da pesquisa compartilhando comigo essa conquista.

Agradeço à minha mãe, Maria do Socorro e ao meu pai José Antônio por terem se esforçado tanto para me proporcionar uma boa educação, por ter me alimentado com saúde, força e coragem, as quais que foram essenciais para superação de todas as adversidades ao longo desta caminhada.

Agradeço também a toda minha família, que com todo carinho e apoio, não mediram esforços para eu chegar a esta etapa da minha vida.

À minha noiva, Erika Pessoa, que esteve comigo durante toda esta jornada me dando apoio e palavras de encorajamento em momentos fáceis e difíceis.

Agradeço aos meus amigos que estiveram ao meu lado durante todo o curso me ajudando e compartilhando de horas árduas de estudos. Quero agradecer em especial a Suelson Lopes, parceiro e amigo, que me ajudou muito no desenvolvimento e conclusão desta pesquisa.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

*“A tarefa não é tanto ver aquilo  
que ninguém viu, mas pensar o  
que ninguém ainda pensou sobre  
aquilo que todo mundo vê.”  
(Arthur Schopenhauer)*

*Então a nossa boca se encheu de riso e a nossa língua de cântico;  
então se dizia entre os gentios: Grandes coisas fez o Senhor a estes.  
Grandes coisas fez o Senhor por nós, pelas quais estamos alegres.  
Aquele que leva a preciosa semente, andando e chorando, voltará,  
sem dúvida, com alegria, trazendo consigo os seus molhos.  
Salmos 126:2,3,6.*

## RESUMO

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema capaz de monitorar, armazenar, e transmitir à distância informações da corrente de fuga do para-raios que é um indicador do estado operativo do para-raios. Para tanto, foram utilizados um sensor de corrente em núcleo toroidal, fabricado com ligas nanocristalinas e um sistema de armazenamento, tratamento e transmissão de dados, que o habilita a ser utilizado na inspeção de para-raios de óxido de zinco (ZnO). Sua operação visa aumentar a exatidão, a eficiência e a confiabilidade no monitoramento dos para-raios e conseqüentemente a confiabilidade do sistema elétrico. É apresentado um sistema de aquisição de dados, baseado em técnicas de processamento analógico e digital de sinais, visando estudar o desempenho elétrico de um para-raios de óxido de zinco em operação, a partir do monitoramento contínuo da sua corrente de fuga. Os resultados das análises da corrente de fuga podem ser transmitidos diretamente para uma sala de comando da subestação em que o dispositivo estiver instalado. Adicionalmente um *software* foi desenvolvido com a intenção de servir como uma interface ao sistema com a função de realizar os comandos para o dispositivo e registrar os dados adquiridos em um banco de dados. Os sistemas de monitoramento, armazenamento, transmissão e análise foram avaliados tanto individualmente quanto em conjunto, mostrando-se eficientes e exatos. O sistema completo foi avaliado nas dependências do Laboratório de Alta Tensão (LAT) sob alta intensidade de campo elétrico. O sistema de transmissão é capaz de enviar os sinais com as harmônicas essenciais da corrente de fuga para o sistema de recepção, via módulo Xbee pro S2 (padrão zigbee-IEEE 802.15.4).

A partir dos ensaios em laboratório foi possível verificar a validação do sistema e conseqüentemente sua viabilidade técnica para ser aplicado em campo, mostrando índices bem próximos do esperado.

**Palavras-chave:** Para-raios, monitoramento, corrente de fuga, ZnO.

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1.</b> Curva característica típica de um para-raios de ZnO e de SiC.....	14
<b>Figura 2.</b> Curva V-I típica de varistor de ZnO [5].....	16
<b>Figura 3.</b> Formas de onda de tensão e corrente no para-raios operando na região de baixa corrente.....	16
<b>Figura 4.</b> Curvas características V-I típicas de varistores ZnO [1].....	17
<b>Figura 5.</b> Diagrama funcional do sensor de corrente de fuga Lira.....	21
<b>Figura 6.</b> Circuito completo do sistema de transmissão/recepção Lira.....	21
<b>Figura 7.</b> Diagrama de blocos do sistema de avaliação do nível de degradação do para-raios de ZnO [1].....	22
<b>Figura 8.</b> Fotografia do sistema microcontrolado acoplado a um módulo ZigBee [1].....	27
<b>Figura 9.</b> Diagrama de blocos do sistema de monitoramento da corrente de fuga total.....	28
<b>Figura 10.</b> Diagrama esquemático do sensor de corrente.....	29
<b>Figura 11.</b> Circuito elétrico do retificador de onda completa de precisão.....	27
<b>Figura 12.</b> Circuito usado na unidade de condicionamento.....	28
<b>Figura 13.</b> Fotografia do circuito da unidade de entrada interligada à unidade de condicionamento.....	29
<b>Figura 14.</b> Circuito elétrico para o gatilho do sinal VaI.....	30
<b>Figura 15.</b> Formas de onda do circuito comparador de te.....	30
<b>Figura 16(a).</b> Fotografia do circuito de processamento.....	31
<b>Figura 16(b).</b> Fotografia do circuito das placas das unidades de entrada, condicionamento e processamento interligadas.....	35
<b>Figura 17.</b> Módulo de comunicação xbee baseado na tecnologia zigbee.....	33
<b>Figura 18.</b> <i>Software</i> desenvolvido na linguagem C#.....	37
<b>Figura 19.</b> <i>Software</i> desenvolvido para o projeto na linguagem C#, opção de salvar arquivo "txt".....	38
<b>Figura 20.</b> Arranjo experimental utilizado para medição de tensão e corrente de fuga do para-raios de ZnO.....	39
<b>Figura 21.</b> Fotografias do arranjo experimental utilizado para a medição de tensão e corrente de fuga no para-raios ZnO.....	39
<b>Figura 22.</b> Resposta em amplitude e frequência do sensor de corrente.....	36
<b>Figura 23.</b> Formas de onda da tensão, corrente de fuga sobre resistor <i>shunt</i> , e corrente de fuga medida pelo sistema de monitoramento.....	37
<b>Figura 24.</b> Formas de onda da corrente de fuga sobre resistor <i>shunt</i> , e corrente de fuga medida pelo sistema de monitoramento sobrepostas.....	37
<b>Figura 25.</b> Formas de onda da Corrente de fuga medida pelo sistema de monitoramento.....	38
<b>Fig. A1. 1.</b> Imagem do PIC 18F452 da Microchip.....	48
<b>Fig. A1. 2.</b> Diagrama dos pinos do PIC 18F452.....	50
<b>Fig. A1. 3.</b> Diagrama de blocos microcontroladorpic 18F452.....	51
<b>Fig. A2. 1.</b> Diagrama dos pinos do DS 1302.....	53
<b>Fig. A2. 2.</b> Circuito de interligação do DS 1302.....	54
<b>Fig. A3. 1.</b> Circuito de interligação do sensorDHT11.....	54
<b>Fig. A3. 2.</b> Circuito de interligação doDHT11 no PIC 16F628A.....	55
<b>Fig. A4. 1.</b> Sinal RS-232 na transmissão de um <i>byte</i> .....	55
<b>Fig. A4. 2.</b> Circuito integrado MAX232.....	56
<b>Fig. A4. 3.</b> Exemplo de comunicação serial RS 232 com PIC.....	56

# LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Dimensões físicas dos núcleos toroidais .....	20
<b>Tabela A1.</b> Funcionalidade dos pinos do microcontrolador PIC18F452 .....	43

# SUMÁRIO

Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vii
Lista de Ilustrações.....	viii
Lista de Tabelas.....	ix
Sumário.....	x
1 Introdução.....	12
1.1 Considerações Iniciais.....	13
1.2 Objetivos.....	13
2 Fundamentação Teórica.....	14
2.1 Características Elétricas de um Para-raios de ZnO.....	14
2.2 Corrente de Fuga do Para-raios de ZnO.....	16
2.2.1 Componente Capacitiva da Corrente de Fuga.....	17
2.2.2 Componente Resistiva da Corrente de Fuga.....	17
2.3 Monitoramento dos Para-Raios.....	18
3 Revisão Bibliográfica.....	19
3.1 Sistema de Monitoramento sem Fio Proposto por Lira.....	19
3.2 Sistema de Monitoramento sem Fio Proposto por Macêdo.....	22
4 Metodologia.....	23
4.1 Sistema de Monitoramento Online de Para-Raios de ZnO com Base na Medição da Corrente de Fuga.....	24
4.1.1 Unidade de Entrada.....	24
4.1.1.1 Aquisição do Sinal da Corrente de Fuga.....	24
4.1.1.2 Aquisição Da Temperatura e Umidade.....	26
4.1.2 Unidade de Condicionamento.....	27
4.1.2.1 Retificador de Precisão.....	27
4.1.2.2 Adição de Nível CC.....	28
4.1.2.3 Circuito de Gatilho.....	29
4.1.3 Unidade de processamento.....	30
4.1.4 Unidade de transmissão e recepção.....	32
4.2 Software desenvolvido.....	33
4.3 Validação do sistema.....	34
5 Resultados e Análises.....	35
5.1 Resultado da resposta em frequência do sensor de corrente.....	35
5.2 Resultado do sistema de monitoramento da corrente de fuga do para-raios de ZnO.....	36
6 Conclusão.....	39
6.1 Trabalhos Futuros.....	39
7 Bibliografia.....	40
ANEXO.....	42

<b>A1. Microcontroladores</b> .....	42
<b>A1.1. PIC 18F452</b> .....	42
<b>A1.2. Estrutura interna do microcontrolador PIC 18F452</b> .....	44
<b>A1.2.1 A CPU</b> .....	45
<b>A2. Relógio em Tempo Real – RTC</b> .....	47
<b>A3. Sensor DHT11</b> .....	48
<b>A4. Comunicação Serial RS-232</b> .....	49

# 1 INTRODUÇÃO

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 em linha, objetivando uma manutenção preventiva e preditiva, uma vez que este tipo de manutenção só pode ser realizado em dispositivos que permitem a existência de acompanhamento.

Quando o para-raios de ZnO está operando normalmente ele é exposto a diferentes tipos de estresses como sobretensões e sobrecorrentes transitórias devido à comutação e à descargas atmosféricas, estresses devido à poluição, ao uso contínuo e à própria corrente de fuga que o atravessa. Estes estresses podem causar aumento da componente resistiva do para-raios e esse aumento pode ultrapassar o limite crítico, causando falhas no equipamento, existindo até o risco de explosão e conseqüentemente danos a equipamentos e pessoas que estiverem nas proximidades.

Na proteção contra descargas, atmosféricas ou de chaveamento, o para-raios é um dispositivo de primordial importância. O seu estado de funcionamento tem efeito direto sobre a proteção de outros equipamentos e influência direta na segurança e na confiabilidade de todo o sistema de potência. Devido à sua importância o para-raios deve ser monitorado continuamente.

A partir da medição da corrente de fuga é possível obter informações de grande importância sobre a sua condição de integridade ou degradação, sendo necessária a lavagem ou, até mesmo em alguns casos, a retirada do sistema.

O para-raios de óxido de zinco é composto por varistores, que quando estão em operação por eles passa sempre uma corrente da ordem de microampères, devido a tensão da rede. Mesmo sendo a vida útil dos para-raios longa (aproximadamente 30 anos), eles vão sendo deteriorados lenta e continuamente, o aumento da componente resistiva da corrente de fuga faz com que a degradação acelere, diminuindo sua vida útil. Quando ela passa de um determinado nível, existe um risco de se iniciar um processo de avalanche térmica, podendo resultar na destruição completa do para-raios.

Assim, mais uma vez é possível destacar que é altamente necessário o monitoramento da corrente de fuga. Nesse trabalho foi desenvolvido um sistema capaz de monitorar, armazenar e transmitir sinais da corrente de fuga, criando assim um banco de dados para diagnóstico do mesmo.

O sistema foi montado e submetido a diversos testes em laboratório, tendo apresentado resultados satisfatórios e compatíveis com os valores esperados.

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Equipamentos como o termovisor e o LCM (*Leakage Current Monitor*) são aparelhos que fazem o monitoramento de para-raios através de imagens térmicas e por meio da corrente de fuga, respectivamente. Ambos os métodos tem vantagens e desvantagens.

O LCM apresenta alto custo, por ser importado, e é necessário uma série de adaptações para o tornarem adequado ao clima brasileiro. Além disso ele apresenta baixa exatidão nos valores fornecidos, e antes era necessária a conexão via cabo para a transferência de dados para o computador, o que não permitia uma análise contínua, ou em tempo real [1].

O termovisor 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. Assim, através das imagens é possível detectar quando o para-raios está aquecendo ou quando está normal. As desvantagens do termovisor são que além de ser necessário que ele esteja próximo do para-raios, ele não transmite as informações sem a necessidade de cabo, tem capacidade limitada para a identificação de defeitos internos na medida que o mesmo não pode ser exteriorizado pelo aumento de temperatura, a contaminação da atmosfera através de poluentes ou outras fontes de irradiação pode confundir a análise do defeito, o estado de carga do elemento sob análise pode influir na determinação de anomalias [2].

Assim, esse trabalho foi desenvolvido a partir da devida necessidade, das empresas do setor elétrico, de monitorar em tempo real a corrente de fuga do para-raios de óxido de zinco, remota e continuamente, visando a análise das condições reais de funcionamento. Para atender essa necessidade foi construído um sistema de medição e registro da corrente de fuga, 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.

O sistema desenvolvido, de sua forma geral, atua com tarefas realizadas por *hardware* e *software*. O *hardware* tem o papel de realizar todo o processamento analógico digital do sinal, sendo constituído pelas unidades de entrada, condicionamento, processamento, transmissão e recepção. O *software*, é responsável pelos comandos e pelo armazenamento.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um sistema de monitoramento da corrente de fuga de para-raios de ZnO que possibilite registrar a forma de onda da corrente de fuga total de um

para-raios em campo, e enviá-la para a sala de comando da subestação através de uma rede de comunicação sem fio. Para tanto, tem-se os seguintes objetivos específicos:

- Utilizar um sensor de corrente capaz de detectar, com exatidão, sinais de corrente de fuga total em para-raios instalados em campo;
- Utilizar um sistema microcontrolado para capturar o sinal da corrente de fuga oriundo do sensor de corrente (sinal analógico) e converter para um sinal digital;
- Realizar a transmissão sem fio entre o conjunto de medição (sensor de corrente mais microcontrolador) e um ponto distante;
- Armazenar os dados lidos em um banco de dados via *software* para futuras análises.

A validação do sistema de monitoramento será realizada através da análise comparativa entre os sinais de corrente de fuga total de um para-raios de ZnO medidos em laboratório utilizando um resistor *shunt* e os sinais de corrente obtidos utilizando o sistema de monitoramento.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DE UM PARA-RAIOS DE ZNO

A principal característica do para-raios à ZnO é a sua alta não linearidade entre a tensão e a corrente (curva V-I). Esta característica representou um avanço em relação aos para-raios convencionais a carboneto de silício (SiC), pois diferente do que ocorre com o SiC, essa característica permite sua conexão direta com o sistema elétrico gerando apenas uma corrente de fuga na faixa de microampères em condições normais de operação. Dispensou-se então o uso de centelhadores em série com a coluna de elementos varistores. A Figura 1 mostra curvas características típicas de para-raios à ZnO e à SiC.

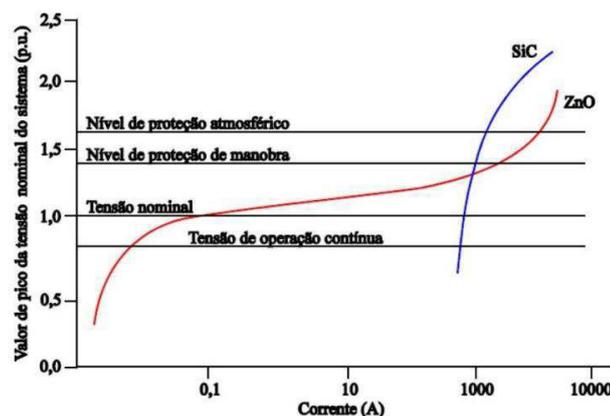


FIGURA 1. Curva característica típica de um para-raios de ZnO e de SiC.

Devido a sua característica V-I altamente não linear, no para-raios à ZnO, durante a passagem de uma descarga de corrente elétrica, a corrente de fuga que era da ordem de microampères pode atingir quiloampères, e cessada a descarga, o para-raios retorna a sua condição normal de operação.

As terminologias tensão nominal ( $U_r$ ) e Máxima Tensão de Operação Contínua (MCOV) utilizadas em para-raios de ZnO causam muita confusão, por terem conceitos diferentes dos demais equipamentos. De acordo com normas da IEC e IEEE, essas terminologias são definidas como:

- TENSÃO NOMINAL ( $U_r$ ): Maior valor da tensão RMS à frequência industrial admissível entre os terminais do para-raios, para a qual o para-raios é projetado para funcionar adequadamente em condições de sobretensões temporárias, tal como definido no teste de ciclo de operação [3].
- MÁXIMA TENSÃO DE OPERAÇÃO CONTINUA (MCOV): Valor máximo de tensão RMS à frequência industrial, que pode ser aplicado continuamente entre os terminais do para-raios [4].

Diferentemente de outros equipamentos elétricos de potência, como por exemplo, o transformador de potência, a tensão nominal do equipamento para-raios não é o valor da tensão RMS nominal do sistema para o qual o equipamento foi projetado. Já a MCOV é similar ao conceito de tensão nominal do transformador, por exemplo, ou seja, máximo valor de tensão RMS à frequência industrial que pode ser aplicado continuamente entre os terminais do equipamento, no qual o fabricante garante preservação das características térmicas.

O nível de proteção atmosférico e de manobra são valores de tensões de pico resultante da aplicação de impulso de tensão, cuja forma de onda é padronizada, 1,2/50  $\mu$ s e 250/2500  $\mu$ s, respectivamente.

Os para-raios de ZnO são instalados entre a fase e a terra, de forma que haverá uma corrente circulando pelo para-raios, denominada corrente de fuga. Devido à elevada não linearidade entre a tensão e corrente, o para-raios pode atuar em três regiões distintas: baixa corrente, alta não linearidade e alta corrente [5], como pode ser vista na Figura 2. Em regime normal de operação a corrente de fuga do para-raios encontra-se na região de baixa corrente. Nesta região 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 [3]. O para-raios opera nesta região durante praticamente toda sua vida útil.

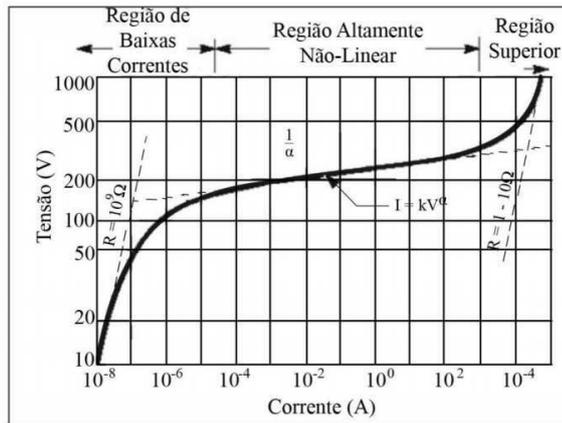


FIGURA 2. Curva V-I típica de varistor de ZnO [5].

- Região de baixas correntes de operação ou pré-ruptura, também conhecida como região de baixas tensões aplicadas (medida sob aplicação de tensões alternadas ou contínuas);
- Região altamente não linear de operação, também conhecida como região altamente não linear de tensões intermediárias (medida por impulsos de corrente representando surtos atmosféricos e de manobra);
- Região superior de operação, também conhecida como região de *Upturn* da tensão (medida por correntes do tipo 8/20 $\mu$ s ou 4/10 $\mu$ s).

Na Figura 3 é observada uma forma de onda típica da corrente de fuga medida em laboratório, em um para-raios de distribuição, tensão nominal 12 kVRMS, quando energizado a uma tensão MCOV de 10,2 kVRMS na região de baixas correntes.

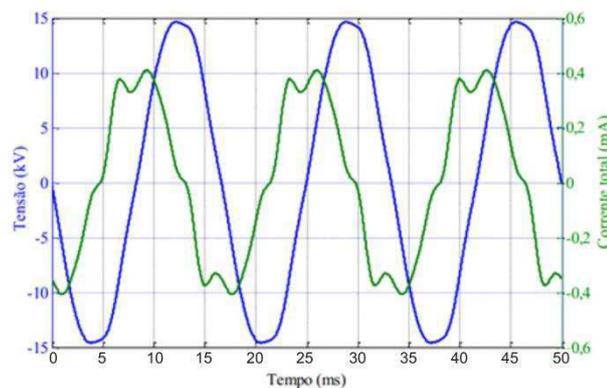


FIGURA 3. Formas de onda de tensão e corrente no para-raios operando na região de baixa corrente.

## 2.2 CORRENTE DE FUGA DO PARA-RAIOS DE ZNO

A corrente de fuga de um para-raios de óxido de zinco reflete diretamente as suas condições operacionais, de degradação dos varistores e/ou de poluição superficial. Portanto, a medição da

corrente de fuga pode fornecer dados para o diagnóstico do para-raios. O efeito da poluição é mais efetivo quando a umidade é alta.

Serão apresentadas algumas técnicas utilizadas na determinação da corrente de fuga total e seus processos de discriminação das componentes resistiva e capacitiva, além do seu conteúdo harmônico. Discutem-se ainda alguns métodos empregados para monitoramento e diagnóstico dos para-raios de ZnO. Alguns destes métodos são adequados para uso tanto em laboratório quanto em campo. Além disso, é discutido o efeito da presença de harmônicos na rede sobre a medição da corrente de fuga total e de suas componentes.

### 2.2.1 COMPONENTE CAPACITIVA DA CORRENTE DE FUGA

A componente capacitiva da corrente de fuga medida no terminal de aterramento do para-raios deve-se à permissividade dos elementos não lineares, às capacitâncias parasitas e aos capacitores de equalização, se aplicados. A capacitância de um varistor de ZnO está entre 60pF.kV/cm<sup>2</sup> a 150pF.kV/cm<sup>2</sup> (tensão nominal), resultando em um valor de pico da corrente capacitiva situado entre 0,2 mA a 3 mA em condições normais de operação [3].

### 2.2.2 COMPONENTE RESISTIVA DA CORRENTE DE FUGA

Para valores definidos de tensão e temperatura, a componente resistiva da corrente de fuga é um bom indicador das mudanças na característica V-I do para-raios de ZnO. Sendo assim, a corrente resistiva pode, portanto, ser utilizada como uma ferramenta de diagnóstico para indicação de degradações dos para-raios de ZnO em serviço. Curvas características V-I típicas das componentes resistivas e capacitivas sobre tensões alteradas são observadas na Figura 4. Para comparação, as curvas características V-I para tensões contínuas também são observadas na Figura 4.

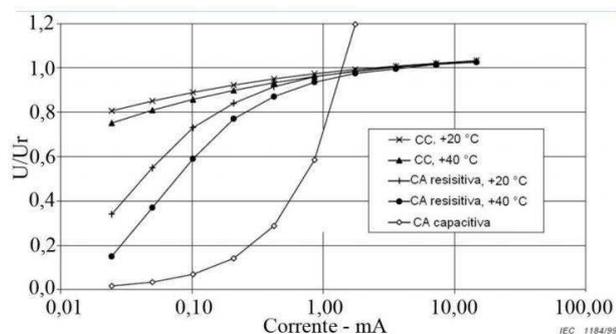


FIGURA 4. Curvas características V-I típicas de varistores ZnO [3].

A característica V-I é ôhmica (linear) nesta região conhecida como região de baixas correntes ou região de pré-ruptura, correspondendo à atuação do varistor na ausência de sobretensões, estando então submetido à tensão de operação do sistema.

A componente resistiva da corrente de fuga na região de pré-ruptura representa cerca 5% a 20% da componente capacitiva da corrente de fuga em condições normais de operação [3].

Os para-raios de óxido de zinco sofrem degradação em operação sob a influência da tensão aplicada de forma continuada, de descargas internas, da distribuição não uniforme da tensão devido à má distribuição de potencial e a poluição, do possível ingresso de umidade e da ocorrência das sobretensões e surtos. Todos estes fatores podem resultar no incremento da componente resistiva da corrente de fuga [6].

A determinação da intensidade da corrente de fuga e de sua componente resistiva, bem como, a determinação dos componentes harmônicos da corrente resistiva é de fundamental importância para o diagnóstico das reais condições de operação de um para-raios de óxido de zinco.

A corrente de fuga pode ser modelada como a soma de uma componente linear capacitiva e uma componente não linear resistiva, que é proporcional à potência absorvida pelos varistores. Se a potência absorvida exceder a capacidade de dissipação do para-raios, a corrente e a temperatura aumentarão progressivamente, isto é, o para-raios atingirá o desencadeamento térmico (avalanche térmica). O coeficiente de temperatura negativo, característico do bloco de óxido de zinco na região de baixa corrente, é responsável por uma diminuição de sua resistência não-linear, levando a corrente de fuga resistiva a crescer. A dependência desta corrente com a temperatura tem sido amplamente investigada [7].

A componente resistiva da corrente de fuga é um bom indicador do estado de degradação do para-raios. Devido à componente resistiva estar defasada de 90° da componente capacitiva e representar uma pequena parcela da corrente de fuga total (em torno de 10% para um para-raios em bom estado de conservação), uma grande variação da corrente de fuga resistiva pode implicar em uma pequena variação da corrente de fuga total. Por isso, a corrente de fuga total geralmente não é registrada, e não se tem um banco de dados que possibilite a correlação dos principais defeitos dos para-raios com a corrente de fuga total.

## 2.3 MONITORAMENTO DOS PARA-RAIOS

Praticamente todos os equipamentos comerciais utilizados para o monitoramento da corrente de fuga em para-raios de ZnO visam monitorar o comportamento da componente resistiva da

corrente de fuga total. Para isso são utilizados métodos de decomposição da corrente de fuga, em que cada método realiza aproximações para o cálculo da corrente resistiva [8], [9], [11], [15], [16] [17].

O relatório da ABRATE (Associação Brasileira das Grandes Empresas de Transmissão de Energia Elétrica) de 2012 comparou medições de corrente de fuga em para-raios realizadas por diversos equipamentos comerciais, e verificou erros de mais de 30% na determinação da corrente resistiva, inclusive entre equipamentos do mesmo fabricante. Uma das justificativas apresentadas no relatório sobre a discrepância dos valores entre equipamentos do mesmo fabricante é a falta de padronização do procedimento de medição.

Foi observado também que a corrente de fuga total comporta-se de maneira diferente para os diferentes tipos de defeitos de para-raios, e assim é possível, utilizando a corrente de fuga total, diagnosticar o para-raios quanto à existência ou não de defeito, e caso esteja defeituoso, qual o tipo de defeito característico [6].

Com base nas literaturas estudadas, se faz necessário elaborar um sistema de monitoramento da corrente de fuga total, 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 [6]. Que assim, permita 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.

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 SISTEMA DE MONITORAMENTO SEM FIO PROPOSTO POR LIRA

Foi proposto um sistema de monitoramento da corrente de fuga em para-raios de ZnO, utilizando para isso um sensor de corrente a base de ligas nanocristalinas, condicionadores de sinais para adequar o nível de tensão do sensor de corrente ao nível de tensão permitido para o microcontrolador (0 a 5V), um microcontrolador para realizar a conversão analógico para digital e também realizar o processamento dos dados, e um sistema de transmissão sem fio, utilizando modulação em frequência [8].

A pesquisa desenvolvida por Lira apresenta a investigação de alguns materiais magnéticos que poderiam ser utilizados para a construção do sensor de corrente. Os núcleos toroidais utilizados para testes possuíam composições químicas a base de ferrite MnZn, NiFe, FeSi e ligas nanocristalinas. Dentre os materiais avaliados a liga nanocristalina a base de FeSiBNbCu, fabricado pela MECAGIS®, e denominada de N3E3, foi a que forneceu melhores resultados e por isso foi a utilizada para a construção do sensor de corrente. Dentre as características avaliadas, destacam-se a permeabilidade magnética  $\mu_r$ , a coercividade, a linearidade, a resposta em frequência e a saturação do núcleo ( $B_s$ ) [8].

É possível observar na Tabela 1 o resultado das medições realizadas com diferentes núcleos de materiais magnéticos para efeito de comparação [8].

**TABELA 1.** Dimensões físicas dos núcleos toroidais.

	Dimensões (mm) ( $D_e \times D_i \times H$ )	$L_r$ (cm)	$A_r$ (cm <sup>2</sup> )
<b>HiB</b>	20x15x15	5,5	0,37
<b>TH-50</b>	27x16x12	6,75	0,65
<b>HyMu80</b>	28x20x10	7,54	0,4
<b>M-033</b>	25x16x10	6,34	0,36
<b>M-006</b>	40x25x15	10,2	0,9
<b>N47B3</b>	30x20x10	7,85	0,4
<b>FINEMET</b>	76x50x12	18,84	2,0
<b>N3E3</b>	40x25x15	10,2	0,9

A partir da tabela e dos estudos já desenvolvidos na literatura, é possível concluir que os núcleos da família das ligas nanocristalinas são os que apresentam melhor desempenho. Logo nesse trabalho foi utilizado o núcleo N3E3.

Para a medição da corrente de fuga em para-raios de ZnO, devido principalmente a baixa amplitude da corrente de fuga em regime normal de operação (em torno de 1 mA), necessita-se de um núcleo magnético que apresente uma alta permeabilidade magnética, para ser sensível a baixas correntes; uma baixa coercividade para ser facilmente magnetizável e desmagnetizável quando submetido a um fluxo magnético variante no tempo; uma alta linearidade para garantir a mesma relação de transformação e uma larga faixa de frequência, tendo em vista que a corrente de fuga total em para-raios de ZnO é composta por significativas componentes harmônicas.

O sensor de corrente proposto por Lira é composto por núcleo toroidal com 26 espiras, um amplificador diferencial, um integrador passivo em que é conectado mais um estágio de amplificação, de forma a se ter uma tensão  $V$  proporcional a corrente de fuga total do para-raios, conforme visualizado na Figura 5.

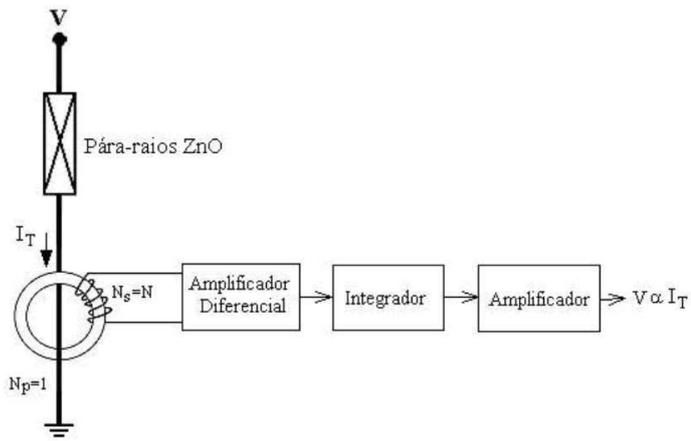


FIGURA 5. Diagrama funcional do sensor de corrente de fuga [8].

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 corrente de fuga total foram utilizados para determinar a diferença de fase entre a tensão e corrente de fuga total, e assim, aplicando o método da diferença de fase apresentado por Lira, determinar a componente resistiva da corrente de fuga. Para tanto, foi projetado e montado um sistema completo de um gravador digital para a aquisição das amostras da corrente de fuga e da tensão utilizando-se um microcontrolador PIC18F452 com as rotinas para o processamento digital dos sinais embutidas.

Na Figura 6 é apresentado o sistema de transmissão/recepção completo, desenvolvido por Lira. O sinal da corrente de fuga total é modulado em PWM, operando com portadora em 2500 Hz, antes de submetê-lo a modulação em FM com portadora de 112 MHz.

De acordo com o autor, este procedimento visa assegurar uma forma de imunidade mais robusta da transmissão da informação desejada preservando-se contra erro de fase, importante para a confiabilidade da técnica de decomposição da corrente de fuga empregada.

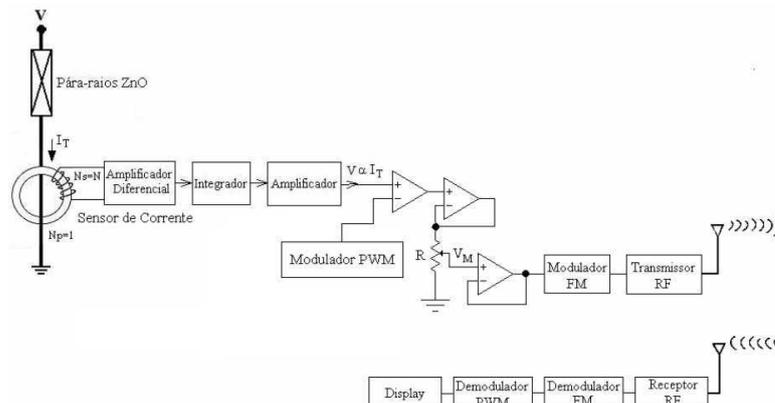


FIGURA 6. Circuito completo do sistema de transmissão/recepção Lira.

## 3.2 SISTEMA DE MONITORAMENTO SEM FIO PROPOSTO POR MACÊDO

Macêdo propõe um sistema de monitoramento da corrente de fuga em para-raios de ZnO similar ao proposto por Lira. As diferenças do sistema de monitoramento proposto por Macêdo consistem basicamente em:

- Melhoria no sistema de proteção, incluindo, por exemplo, o uso de optoacopladores para isolar eletricamente o sinal da tensão proveniente do transformador de potencial, do circuito eletrônico para condicionamento do sinal;
- Uso de um retificador de precisão para possibilitar uma tensão maior (dobro) na entrada do microcontrolador, aumentando a Relação Sinal Ruído (SNR).
- Transmissão de dados utilizando o padrão ZIGBEE, em vez de modulação em frequência.
- Submissão do sistema de monitoramento a descargas de corrente, com o objetivo de avaliar a suportabilidade do sistema a descargas atmosféricas típicas.
- Desenvolvimento de um programa computacional com interface gráfica que expõe os resultados obtidos a partir do sistema de monitoramento proposto.

Na Figura 7 é visualizado o diagrama de blocos do sistema de monitoramento da corrente de fuga em para-raios de ZnO proposto por Macêdo. Na Figura 8 é observada a fotografia do sistema de monitoramento.

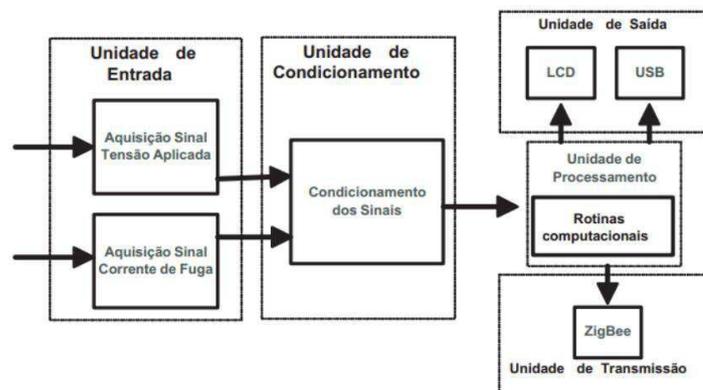
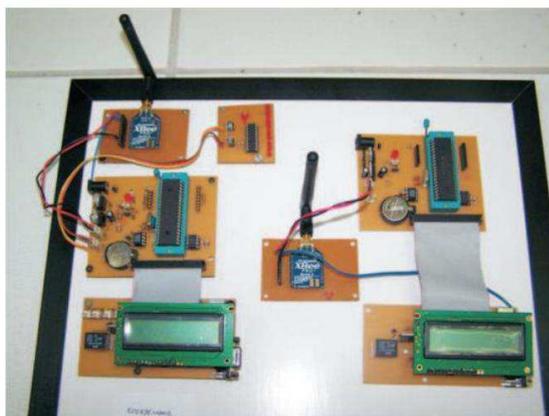


FIGURA 7. Diagrama de blocos do sistema de avaliação do nível de degradação do para-raios de ZnO [1].



**FIGURA 8.** Fotografia do sistema microcontrolado acoplado a um módulo ZigBee [1].

## 4 METODOLOGIA

No monitoramento do para-raios faz-se necessário utilizar um sensor com uma sensibilidade adequada, devido ao baixo valor da componente resistiva, da ordem de dezenas ou centenas de microampères. Foi realizada a análise de alguns materiais de sensores chegando ao resultado que o N3E3, nome designado ao núcleo toroidal fabricado com ligas nanocristalinas, foi o que apresentou melhores resultados [1].

Para a aquisição e breve tratamento foi usado um microcontrolador PIC18F452 com conversor analógico digital interno. Os valores amostrados são gravados de forma a permitir a observação do comportamento e da evolução da corrente de fuga ao longo do tempo.

O sistema de comunicação foi feito a partir do módulo Xbee Pro S2 (padrão zigbee-IEEE 802.15.4), utilizando um transmissor (*coordenador*) e um receptor (*end device*). A transmissão remota da informação sobre o estado do para-raios aumenta a confiabilidade do sistema como também reduz o risco de acidentes nas subestações.

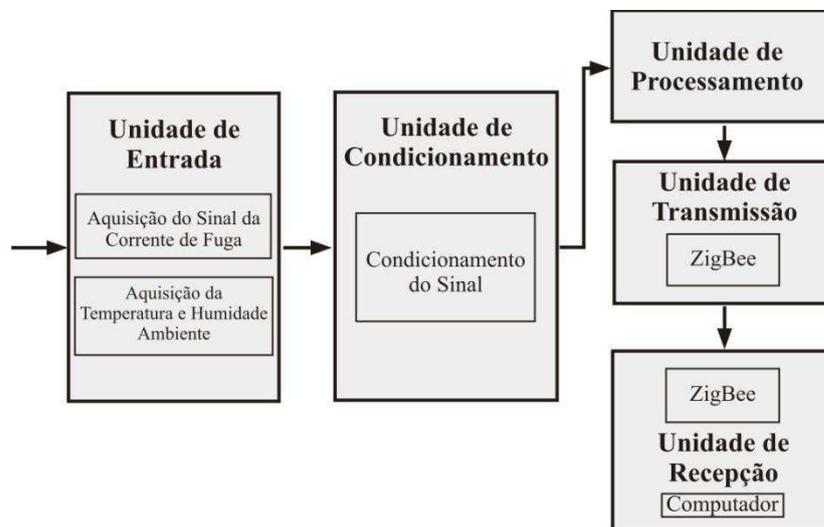
O comando das funções do sistema e o armazenamento dos dados lidos serão realizados por um *software* desenvolvido também nesse trabalho, encontrado na unidade de recepção.

## 4.1 SISTEMA DE MONITORAMENTO ONLINE DE PARA-RAIOS

### DE ZNO COM BASE NA MEDIÇÃO DA CORRENTE DE FUGA

Com base nas literaturas estudadas, em especial as citadas acima, foi desenvolvido um sistema que une as características já mencionadas e apresenta novas características com a intenção de criar um sistema ainda mais preciso e confiável.

O sistema de monitoramento desenvolvido neste trabalho é composto por diversos circuitos eletrônicos, os quais desempenham funções específicas e determinadas. A Figura 9 apresenta através de um diagrama de blocos o sistema proposto.



**FIGURA 9.** Diagrama de blocos do sistema de monitoramento da corrente de fuga total.

#### 4.1.1 UNIDADE DE ENTRADA

##### 4.1.1.1 AQUISIÇÃO DO SINAL DA CORRENTE DE FUGA

O circuito de aquisição da corrente de fuga é composto por um núcleo toroidal usado como transformador de corrente (T.C.), denominado N3E3 [1], [10]. Conectado ao T.C., utilizou-se um amplificador diferencial de instrumentação (INA 114), específico para amplificação de sinais de pequenas amplitudes e que permite a rejeição de ruído. Sabendo que a corrente de fuga  $I_T$  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  $I_T$ , fazendo-se necessário o uso de um circuito integrador, dessa forma, na saída do integrador haverá uma tensão diretamente proporcional a corrente de fuga que circula no para-raios. Após o circuito

integrador foi utilizado um amplificador para dar um ganho no sinal, melhorando assim a sua resolução. Na Figura 10 é mostrado o diagrama elétrico utilizado na implementação do circuito de aquisição da corrente de fuga do para-raios.

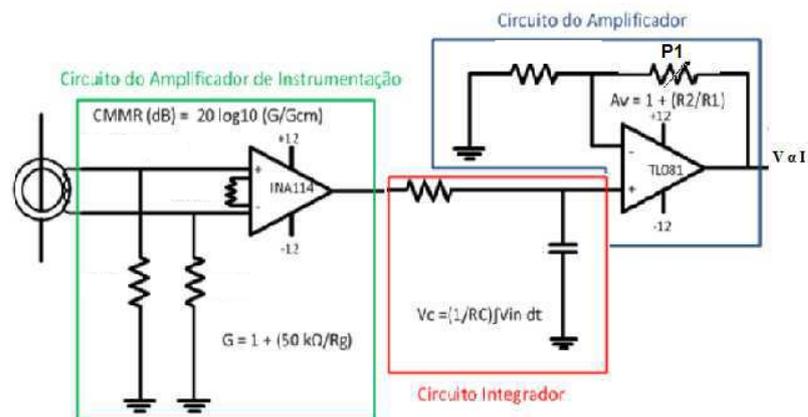


FIGURA 10. Circuito da unidade de entrada.

As componentes do sensor de corrente são ajustadas de forma a se ter a relação desejada da tensão proporcional a corrente e uma resposta em frequência satisfatória.

Para o circuito do amplificador de instrumentação foram utilizados os resistores  $R1=R2$  para definir uma tensão diferencial. O resistor  $R3$  é responsável pelo ganho do INA 114. Inicialmente foi utilizado um potenciômetro para definir qual a resistência do resistor  $R3$  que proporciona ao circuito uma tensão na saída de 1 V para uma corrente de entrada de 1 mA.

Devido à corrente de fuga total do para-raios possuir uma baixa amplitude, para um para-raios em bom estado de conservação submetido à tensão normal de operação, a tensão induzida no núcleo toroidal também possui uma baixa amplitude, de poucos milivolts. Sendo assim, a amplitude do sinal proveniente do TC é compatível com sinais externos (ondas de rádio, indução de tensões de circuitos adjacentes, corona, etc) e dessa forma pode vir a mascarar o sinal desejado. Por isso, para o circuito do sensor de corrente de fuga em para-raios de ZnO, a principal característica do amplificador de instrumentação (INA) é o CMRR (*Common Mode Rejection Ratio*), que é a capacidade que o amplificador tem de rejeitar o sinal comum as entradas do amplificador diferencial. O CMRR geralmente é fornecido no catálogo dos fabricantes na escala dB, e é dado pela expressão (1):

$$\text{CMRR (dB)} = 20 \log_{10} (G/G_{cm}), \quad (1)$$

em que:

$G$  = Ganho de tensão de modo diferencial;

$G_{cm}$  = Ganho de tensão de modo comum.

O INA 114 possui um CMRR de 110 dB para uma faixa de ganho de tensão de modo diferencial de 100 a 1000, isso implica que o ganho de tensão em modo comum é amplificado 300.000 vezes menos que o ganho de tensão em modo diferencial.

O circuito integrador passivo utilizado é composto por um resistor  $R_4$  e um capacitor  $C_1$ . Uma exigência do integrador passivo é que a resistência seja muito maior que a reatância capacitância  $R_4 \gg X_{C1}$ , e dessa forma a corrente no circuito seja majoritariamente capacitiva. O estágio do circuito amplificador é necessário, pois a tensão no capacitor  $C_1$  é muito baixa ( $R_4 \gg X_{C1}$ ). Os resistores  $R_5$  e  $R_6$  utilizados proporcionam um ganho de até 1001 vezes, conforme expressão do ganho descrito em (2):

$$A_v = 1 + (R_6/R_5). \quad (2)$$

A partir do circuito observado na Figura 10 obteve-se uma relação de transformação de 1 V / 1 mA.

Assim, utilizou-se uma proporção de 1 VRMS para cada 1 mA na saída do circuito, através do resistor que regula o ganho do INA 114. O sinal obtido na saída do circuito aparece com um nível CC devido ao ambiente e aos amplificadores operacionais, na intenção de eliminá-lo utilizou-se um filtro melhor explicado na seção de condicionamento.

#### 4.1.1.2 AQUISIÇÃO DA TEMPERATURA E UMIDADE

Para tal foi utilizado o sensor DHT11 que oferece saídas digitais, calibrado para temperatura e umidade. O sensor foi conectado ao sistema de processamento, já que temperatura e umidade são variáveis importantes no diagnóstico dos para-raios, o circuito e funcionamento desse sensor está melhor explicado no ANEXO.

## 4.1.2 UNIDADE DE CONDICIONAMENTO

### 4.1.2.1 RETIFICADOR DE PRECISÃO

Na saída do sensor de corrente tem-se um sinal de tensão proporcional a corrente de fuga do para-raios ( $V \propto I$ ). Como a corrente de fuga é alternada, a tensão de saída também é alternada. Devido ao microcontrolador só permitir na entrada de seu conversor A/D valores de tensão positiva, faz-se necessário adequar a saída do sensor a entrada do microcontrolador.

Uma opção é utilizar um retificador de onda completa na saída do sensor de corrente e inverter o semi-ciclo negativo via *software*. No caso do sensor de corrente para monitoramento da corrente de fuga em para-raios, por possuir uma baixa tensão de saída, a queda de tensão nos diodos (aproximadamente 0,7 para o diodo de silício) inviabiliza a aplicação.

Para solucionar o problema da queda de tensão nos diodos pode-se utilizar um retificador de precisão. Na Figura 11 é visualizado o circuito elétrico desse retificador, a principal vantagem de se utilizar o retificador de precisão é que ele possibilita a digitalização de um sinal com amplitude duas vezes maior, pois apenas um semi-ciclo (positivo) é digitalizado. Isso faz com que a relação sinal ruído (SNR) aumente, tornando o sensor mais imune ao ruído, este que é bastante degradante em sinais de baixa amplitude.

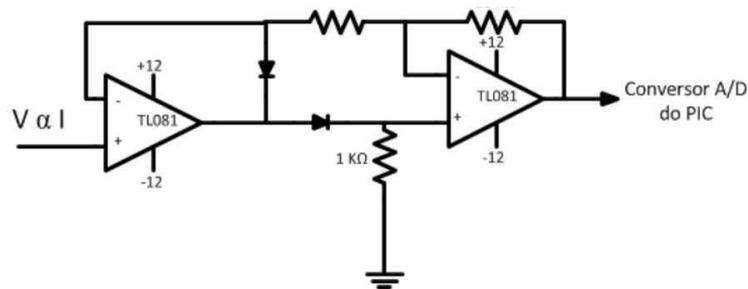


FIGURA 11. Circuito elétrico do retificador de onda completa de precisão.

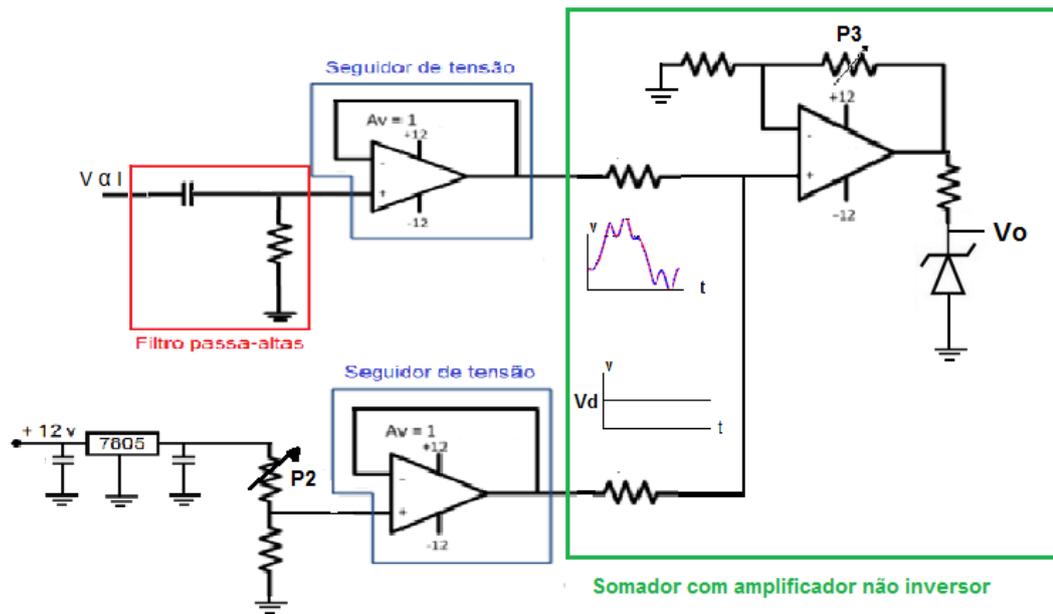
O princípio de funcionamento do retificador de onda completa de precisão consiste em replicar em sua saída o sinal positivo da tensão de entrada, e multiplicar por -1 o semi-ciclo negativo da tensão de entrada. O ganho -1 é proporcionado pelos dois resistores de 10 kΩ do circuito da Figura 11.

#### 4.1.2.2 ADIÇÃO DE NÍVEL CC

Como pode ser visto mais adiante os microcontroladores trabalham numa faixa de tensão de 0 a 5 V e o sinal que adquirimos na saída da unidade de entrada é composto além de uma parte negativa por várias passagens pelo zero, o que dificulta a recuperação dos dados se usar a possibilidade de retificação do sinal, impossibilitando o uso do retificador supracitado.

Assim, para resolver este problema foi criado um circuito de condicionamento que recebe o sinal da unidade de entrada, explicada no tópico anterior, 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.

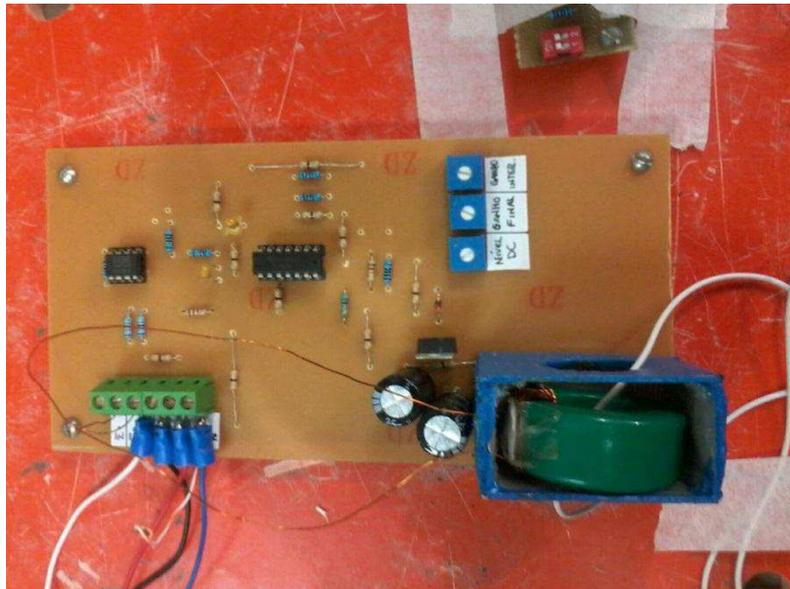
Na Figura 12 é possível visualizar o circuito da unidade de condicionamento. O circuito além do filtro supracitado ainda é utilizado o seguidor de tensão para isolar o sinal, um CI7805 e um divisor de tensão para dar o nível de tensão apropriado para o sinal estar na margem de tensão aceitável pelo microcontrolador, e um circuito somador para somar o sinal filtrado com o nível CC desejado.



**Saída Vo: 1 v/1 mA**

**FIGURA 12.** Circuito usado na unidade de condicionamento.

Foi confeccionada uma placa de circuito impresso (PCI) com as unidades de entrada e condicionamento já interligadas. Na Figura 13 é possível ver uma foto dessa placa.



**FIGURA 13.** Fotografia do circuito da unidade de entrada interligada à unidade de condicionamento.

#### 4.1.2.3 CIRCUITO DE GATILHO

Caso o sinal  $V_{\alpha I}$  seja digitalizado sem um circuito de gatilho, os sinais digitalizados possuirão formas de onda em janelas de tempo diferentes. Isso dificulta uma comparação direta entre as formas de onda digitalizadas. Para solucionar esse problema pode-se utilizar 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 14 é ilustrado o circuito de gatilho utilizado neste trabalho. O circuito proporciona em sua saída uma forma de onda quadrada com amplitudes alternando entre 0V e +5V. Ao entrar com um sinal alternado  $V_{\alpha I}$ , na saída do AMPOP (Amplificador Operacional) TL081 tem-se um sinal alternado semelhante ao visualizado na Figura 15.

Devido ao microcontrolador só permitir sinais positivos de no máximo +5V foi utilizado um diodo retificador para ceifar o semi-ciclo negativo e um regulador de tensão TL7805 para limitar a tensão de saída a +5V.

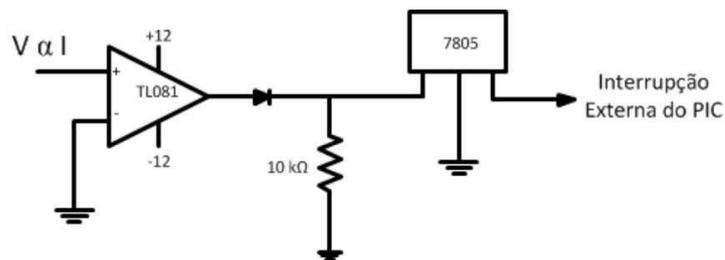


FIGURA 14. Circuito elétrico para o gatilho do sinal  $V_{\alpha I}$ .

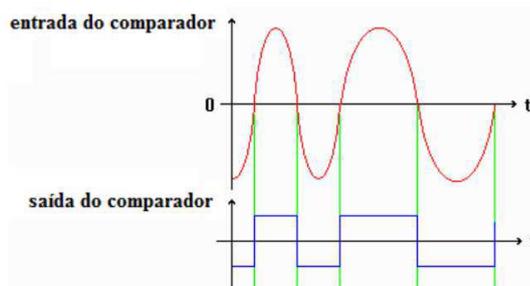


FIGURA 15. Formas de onda do circuito comparador de tensão.

A saída do circuito de gatilho é conectada a entrada de interrupção externa do microcontrolador PIC 18F452. A entrada de interrupção externa pode ser configurada para que o conversor A/D seja ativado quando houver uma borda de subida ( $0\text{ V} \rightarrow +5\text{ V}$ ) ou borda de descida ( $+5\text{ V} \rightarrow 0\text{ V}$ ). Neste trabalho ela foi configurada para que o conversor A/D começasse a digitalizar o sinal  $V_{\alpha I}$  quando houvesse uma borda de subida, ou seja, quando o sinal  $V_{\alpha I}$  cruzasse pelo zero de forma ascendente.

#### 4.1.3 UNIDADE DE PROCESSAMENTO

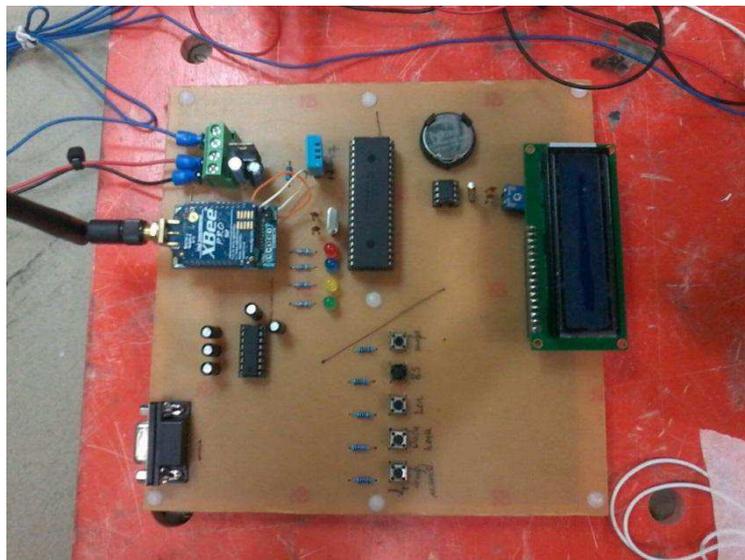
A unidade de processamento é onde os dados são lidos, armazenados e enviados ao computador que ficará na sala de comando da subestação. Para isso foi utilizado o microcontrolador PIC18F452 que está mais detalhado no ANEXO, assim como todas as atividades e acessórios ligados a ele. Através do conversor analógico/digital (A/D) do microcontrolador, a corrente de fuga é armazenada na memória interna e após o comando esses dados são enviados por um sistema sem fio melhor explicado no sistema de transmissão na seção seguinte.

Ainda nessa unidade é feita a leitura da temperatura e umidade proveniente da unidade de entrada, informação de data e hora e apresentação de informação do processo em um LCD 16x2.

No microprocessador são executadas basicamente operações lógicas, aritméticas e de controle, sendo que outras operações, que não estas, são executadas por outros circuitos externos a

ele, chamados de circuitos acessórios ou periféricos. Estes circuitos acessórios têm como funções, por exemplo: executar operações de leitura de informações de dispositivos de entrada de dados, e transmissão de informações para dispositivos de saída de dados. Entretanto, muitos dos circuitos acessórios que estavam implementados externamente ao microprocessador, foram depois incorporados dentro de um único circuito integrado dando origem à outra família de componentes chamados microcontroladores. Estes necessitando de: CPU (*Central Processing Unity*), memória, sistema de *clock*, sinais de entrada e saída (*Input/Output*), como também podemos acrescentar possíveis periféricos, como módulos de temporização e conversores A/D entre outros, integrados de um mesmo chip. Como já mencionado, o microcontrolador utilizado nesse projeto foi o PIC 18F452, que contém os requisitos necessários.

Foi confeccionada também uma placa de circuito impresso (PCI) referente à unidade de processamento. Na figura 16(a) é possível ver uma foto dessa placa.



**FIGURA 16(A).** Fotografia do circuito de processamento.

Na figura 16(b) é possível ver uma foto das placas das unidades de entrada, condicionamento e processamento interligadas.



**FIGURA 16(B).** Fotografia do circuito das placas das unidades de entrada, condicionamento e processamento interligadas.

Outro dispositivo que foi acrescentado ao sistema de processamento foi o RTC (*Real Time Clock*) relógio em tempo real. O dispositivo utilizado foi o DS1302 que é um relógio/calendário serial de baixo custo controlado por um cristal externo de 32,768 kHz. Como o objetivo do projeto é criar um banco de dados a partir do monitoramento do para-raios, a data e hora em que as leituras estão sendo realizadas são de suma importância. A comunicação com o DS1302 é através de interface serial I2C.

Para se permitir fazer a visualização no local (*in loco*), foi incorporado ao sistema um LCD (*Liquid Crystal Display*) 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. Para isso é preciso que o operador por meio de botões inseridos no local da medição acesse essas informações.

#### 4.1.4 UNIDADE DE TRANSMISSÃO E RECEPÇÃO

Optou-se pela transmissão de dados utilizando um sistema de comunicação sem fio. Os módulos de comunicação sem fio XBee-Pro S2 baseados na tecnologia ZigBee permitem a implementação relativamente rápida e com um baixo consumo de energia de uma rede de sensores sem fio.

A seguir, apresentam-se alguns detalhes do padrão de comunicação sem fio: ZigBee IEEE 802.15.4 desenvolvido pela ZigBee Alliance junto com o IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) através de várias empresas participantes. 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, da sala de comando da subestação, visualize a forma de onda da corrente de fuga, assim como, os valores numéricos das grandezas de interesse.

Utilizou-se os módulos XBee-ProS2 devido ao seu alcance e facilidade de implementação e o baixo consumo de energia, tornando-se apropriado para aplicações portáteis. Pode-se observar a partir da fotografia, a existência de dois módulos de processamento e transmissão. Um destes módulos foi configurado como transmissor e outro como receptor, é possível ver os módulos usados na Figura 17.

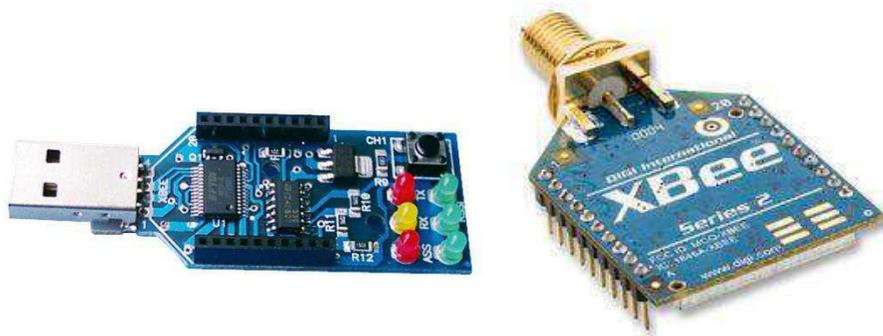


FIGURA 17. Módulos de comunicação Xbee baseado na tecnologia ZIGBEE.

## 4.2 SOFTWARE DESENVOLVIDO

Para esse projeto foi desenvolvido um *software*, utilizando a linguagem de programação C#, que faz toda a interação entre o usuário, que estará na sala de comando, e o protótipo desenvolvido no projeto que será instalado no para-raios. Na Figura 18 podemos ver o *software* desenvolvido.

Neste *software* é possível escolher as portas seriais disponíveis, as quais são detectadas automaticamente, além da velocidade de transmissão, o tipo de paridade, da quantidade de bits de dados e do *stop bit* ou bit de paridade. Outra opção disponível é a possibilidade de fazer transmissão e recepção de dados da porta serial, os dados recebidos ainda podem ser salvos em um arquivo do tipo "txt".

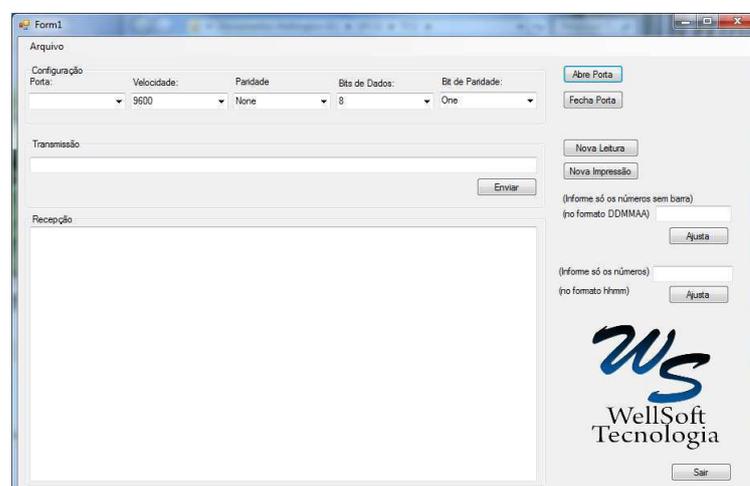


FIGURA 18. *Software* desenvolvido na linguagem C#.

Como pode ser visto na Figura 19. Os botões "Abre Porta" e "Fecha Porta", como os nomes já sugerem, servem para abrir e fechar respectivamente a comunicação serial. O botão de "Nova Leitura" manda um comando para o microcontrolador realizar uma nova leitura através do conversor A/D e o botão "Nova Impressão" envia os dados lidos (corrente, temperatura, umidade, data e hora) e guardados na memória do PIC para o computador. Ainda é disposta a opção de ajuste de data e hora através dos espaços para preenchimento de cada uma, seguida da opção de ajuste no botão correspondente. E por fim um botão para finalizar a execução do programa, "Sair".

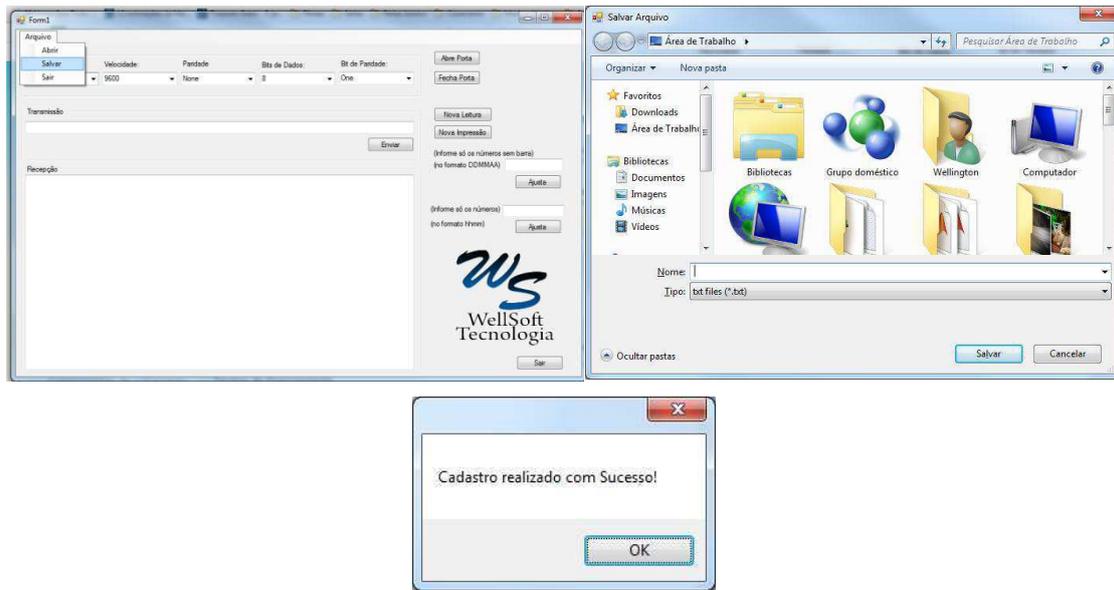


FIGURA 19. Software desenvolvido para o projeto na linguagem C#, opção de salvar arquivo "txt".

### 4.3 VALIDAÇÃO DO SISTEMA

Com o objetivo de validar o sistema desenvolvido para o monitoramento da corrente de fuga em para-raios ZnO com tensão nominal de 72 kV e MCOV de 58 kV, foi medida a corrente de fuga utilizando para isso um resistor *shunt* e o sistema de monitoramento proposto, com o objetivo de comparar os resultados. O ensaio necessário para a medição da tensão e corrente de fuga do para-raios foi realizado utilizando-se como referência o diagrama esquemático do arranjo experimental visualizado na Figura 20.

A corrente de fuga total é medida indiretamente, através da queda de tensão do resistor *shunt*, e da indução proporcionada pela passagem de corrente através do núcleo toroidal. Na Figura 21 podem ser observadas as fotografias do kit de alta tensão e mesa de controle utilizados para realização do ensaio, além dos equipamentos utilizados na validação dos dados adquiridos, transformador, resistor, capacitor, para-raios, assim como a década, utilizada como resistor *shunt*, e

o cabo por onde passa a corrente de fuga, passando por dentro do toróide que faz parte do protótipo desenvolvido.

As placas confeccionadas foram feitas com o objetivo de reduzir efeitos indesejados como ruídos, interferências, nível CC e maus contatos, devido ao circuito antes estar montado em uma matriz de contatos (*protoboard*), organizando melhor a distribuição do circuito e eliminando os efeitos mencionados anteriormente e as desvantagens encontradas nas literaturas mencionadas.

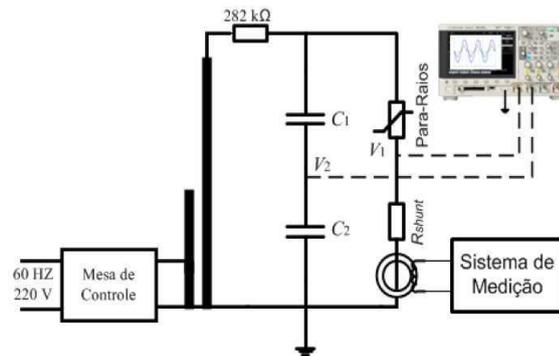


FIGURA 20. Arranjo experimental utilizado para medição de tensão e corrente de fuga do para-raios de ZnO.



FIGURA 21. Fotografias do arranjo experimental utilizado para a medição de tensão e corrente de fuga no para-raios ZnO.

## 5 RESULTADOS E ANÁLISES

### 5.1 RESULTADO DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DO SENSOR DE CORRENTE

Devido à característica não linear do para-raios de ZnO sua corrente de fuga é composta por componentes harmônicas significativas. Portanto, o sensor de corrente deve responder de forma

satisfatória as principais componentes harmônicas que podem surgir na corrente de fuga do para-raios, 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup> e 9<sup>a</sup> ordem.

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. A cada ajuste de amplitude variava-se a frequência do sinal senoidal, para isso foi utilizado um gerador de sinais e um osciloscópio para visualização da forma de onda. Vale ressaltar que a resposta obtida é referente a todo o circuito e não apenas do núcleo toroidal. Na Figura 22 é visualizada a resposta em amplitude e frequência do sensor de corrente, definido o ajusto do ganho do INA 114.

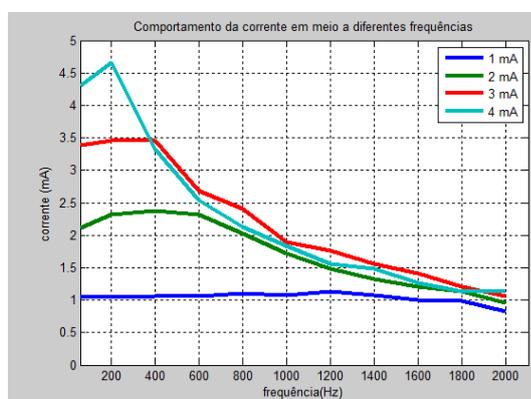
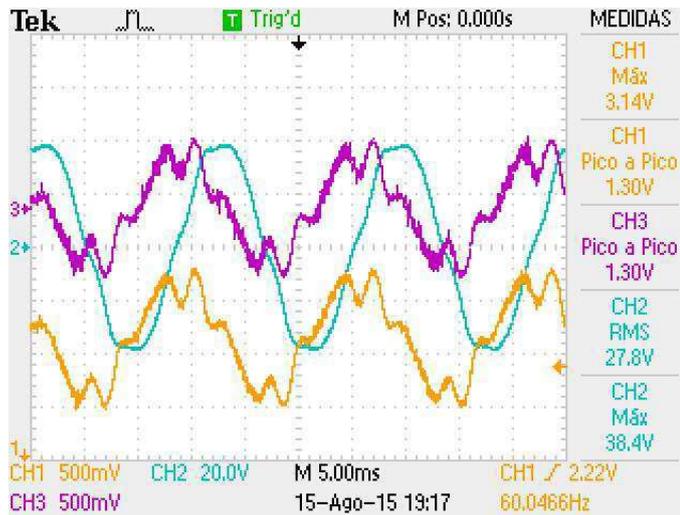


FIGURA 22. Resposta em amplitude e frequência do sensor de corrente.

## 5.2 RESULTADO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO DA CORRENTE DE FUGA DO PARA-RAIOS DE ZNO

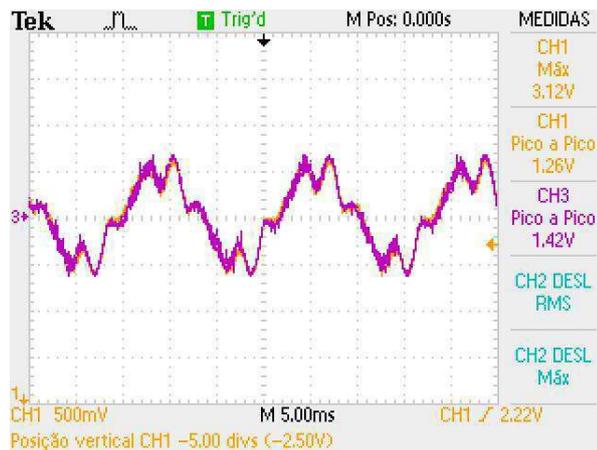
Após os ajustes necessários, de forma a se ter uma tensão de saída proporcional a corrente, com relação de transformação 1 V/1 mA e resposta de amplitude e frequência satisfatória, a etapa seguinte foi validar o sistema de monitoramento através da medição da corrente de fuga do para-raios com tensão nominal 72 kV e MCOV 48 kV. Para isso o para-raios foi submetido à MCOV, e a corrente de fuga foi medida utilizando o resistor *shunt* e o sistema de monitoramento desenvolvido simultaneamente. Em seguida os resultados foram comparados.

Na Figura 23 é possível ver a imagem do osciloscópio com as formas de onda da tensão aplicada ao para-raios (azul), corrente lida a partir do resistor *shunt* (rosa) e corrente lida a partir do sistema de monitoramento (amarelo).



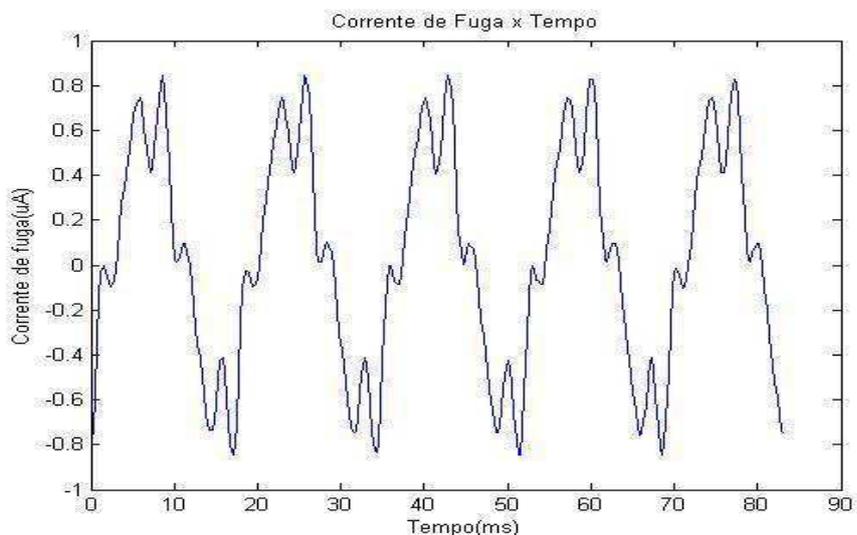
**FIGURA 23.** Formas de onda da tensão (azul), corrente de fuga sobre resistor *shunt* (roxa), e corrente de fuga medida pelo sistema de monitoramento (amarela).

Na Figura 24 é possível ver o as formas de onda da corrente de fuga sobre o resistor *shunt*, e a corrente de fuga medida pelo sistema de monitoramento sobrepostas.



**FIGURA 24.** Formas de onda da corrente de fuga sobre resistor *shunt*, e corrente de fuga medida pelo sistema de monitoramento sobrepostas.

Na Figura 25 é possível ver o gráfico da corrente lida através do sistema de monitoramento após ser enviada para o computador através da unidade de transmissão e recepção.



**FIGURA 25.** Forma de onda da Corrente de fuga medida pelo sistema de monitoramento.

Nas figuras 23, 24 e 25 visualmente já é possível perceber que o sistema atende ao esperado, apresentando a forma de onda similar à lida pelo resistor *shunt*. Para uma análise mais precisa e confiável, foi feito o cálculo do coeficiente de determinação  $R^2$ .

O coeficiente de determinação  $R^2$  indica o quão próximo a 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 (THE MATHWORKS, INC., 2012)

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}$$

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

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

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” for  $R^2$  mais correlacionados estão os sinais.

Após o cálculo foi obtido o resultado **0,9991** provando a validação e confiabilidade do sistema no monitoramento de para-raios de ZnO.

## 6 CONCLUSÃO

Neste trabalho de conclusão de curso (TCC) foi desenvolvido um sistema de monitoramento da corrente de fuga do para-raios de ZnO. Em seguida o sistema foi empregada para a medição da corrente de fuga do para-raios de ZnO, cuja tensão MCOV é 58 kV. A corrente de fuga foi medida utilizando o sistema de monitoramento e através do uso de um resistor *shunt*, os resultados foram comparados. Notou-se que os resultados apresentados pelo sistema de monitoramento obtiveram alta similaridade com a corrente de fuga utilizando o resistor *shunt*, sendo o resultado comprovado a partir do coeficiente de determinação  $R^2$ .

É possível concluir então que o trabalho desenvolvido atendeu com exatidão as necessidades exigidas e que com os ensaios foi possível ser validado.

Com as futuras melhorias, tanto em *hardware* quanto em *software*, pretende-se transformar esse sistema de monitoramento no mais exato e real possível, pensando também no custo-benefício que irá trazer.

### 6.1 TRABALHOS FUTUROS

Para aplicações futuras são propostas as seguintes sugestões:

- Substituição de circuitos passivos por ativos como integrador e filtros usados no *hardware*;
- Atualização do *software* para plotar as curvas da corrente de fuga;
- Diagnosticar o para-raios em tempo real;
- Ensaio em Subestação (SE);
- Usar o PIC 18F4620;
- Atualização do *software* para ser capaz de plotar as formas de onda lidas, e através de estudos apresentar a análise do estado do para-raio pela internet;
- Desenvolver uma fonte de alimentação alternativa para o sistema.

## 7 BIBLIOGRAFIA

- [1] MACÊDO, E. C. T. Sistema de avaliação do nível de degradação de para-raios de óxido de zinco. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica), 2010.
- [2] MAXUEL, V. R., PUC-Rio – Utilização de termovisor no monitoramento de para-raios, 2011
- [3] IEC 60099-4. (2004-05): Surge arresters – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems. ed. 2, 2004.
- [4] IEEE Standard C62.11-2005.Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits (>1 kV), 2005.
- [5] BARBOSA, F. B. Técnicas de Diagnóstico e Correlação com Fenômenos de Degradação em Varistores ZnO. Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro, 2007.
- [6] Fernando, Sudath Namal. Effect of valve element characteristics, stray capacitance and voltage harmonics on surge arrester diagnostics. University of Manitoba. 2001.
- [7] Gupta, Tapan K. Application of Zinc Oxide Varistors. J. Am. Ceram. Soc., Vol. 73, Nº 7, pp. 1817-1840, 1990.
- [8] LIRA, J. G. A. Sistema de aquisição de dados para monitoramento e diagnóstico remoto das condições de para-raios de óxido de zinco. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, (Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica), 2007.
- [9] SPELLMAN, C. A.; HADDAD, A. A Technique for On-Line Monitoring of ZnO Surge Arresters. 10th International Symposium on High Voltage Engineering, Montreal, Canada, Agosto 1997.
- [10] LIRA, G. R. S. Monitoramento da corrente de fuga em para-raios de óxido de zinco com base na medição da corrente de fuga total. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, (Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica), 2012.
- [11] HINRICHSSEN, V. Monitoring of high voltage metal oxide surge arrester. VI Jornadas Internacionales de Aislamiento Eléctrico, Bilbao, 22 –23 Outubro 1997.
- [12] M.P. Pereira, M. Drummond, de "Modelagem de Para-raios de ZnO para Estudos de Sobretensões Transitórias", VIII SNPTEE, São Paulo, 1986.
- [13] URSINE, W. A. M, Monitoramento Autônomo de Para-Raios de ZnO. Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais.
- [14] ABB. High Voltage Surge Arresters – Product Guide. 1995.
- [15] SHIRAKAWA, S.; ENDO, F.; KITAJIMA, H.; KOBAYASHI, S.; KURITA, K.; GOTO, K.; SAKAI, M., Maintenance of surge arrester by a portable arrester leakage current detector. Power Delivery, IEEE Transactions on, v. 3, n. 3, p. 998 - 1003, Julho 1988.
- [16] LUNDQUIST, J.; STENSTROM, L.; SCHEI, A.; HANSEN, B. New method for measurement of the resistive leakage currents of metal-oxide surge arresters in service. Power Delivery, IEEE Transactions on, v. 5, n. 4, p. 1811-1822, Novembro, 1990.
- [17] SOUZA, R. T. Medição e Análise Harmônica da Corrente de Fuga Resistiva em Varistores de ZnO. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica), 2004.

[18] URSINE, W. A. M, Monitoramento Autônomo de Para-Raios de ZnO. Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais. Dissertação de mestrado, Belo Horizonte, 2013.

[19] <http://sodoityourself.com/max232-serial-level-converter/>

[20] MATSUOKA, M. “Propriedades não ôhmicas de cerâmica de óxido de zinco”, Jornal Japonês de Física Aplicada, vol. 10, n. 6, June, 1971.

# ANEXO

## A1. MICROCONTROLADORES

No microprocessador são executadas basicamente operações lógicas, aritméticas e de controle, sendo que outras operações que não estas são executadas por outros circuitos externos a ele, chamados de circuitos acessórios. Estes circuitos acessórios tem como funções, por exemplo: executar operações de leitura de informações de dispositivos de entrada de dados, e transmissão de informações para dispositivos de saída de dados.

Entretanto, muitos dos circuitos acessórios que estavam implementados externamente ao microprocessador, foram depois incorporados dentro de um único circuito integrado dando origem a outra família de componentes chamados **microcontroladores**. Estes necessitando de: CPU (*Central Processing Unity*), memória, sistema de *clock*, sinais de entrada e saída (*Input/Output*), como também podemos acrescentar possíveis periféricos, como módulos de temporização e conversores A/D entre outros, integrados de um mesmo chip.

### A1.1. PIC 18F452

Existe uma grande quantidade de microcontroladores utilizados em projetos de equipamentos eletroeletrônicos. O microcontrolador que utilizamos foi o 18F452 da Microchip. Uma grande vantagem desse microcontrolador é que ele possui memória Flash, possibilitando assim escrever/apagar com grande rapidez.

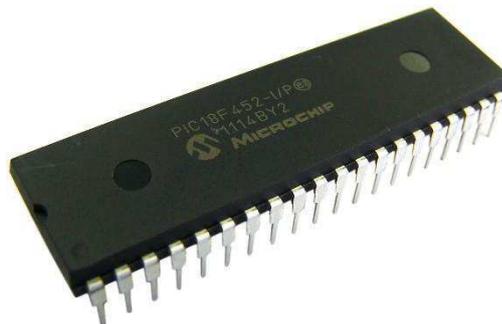


Fig. A1. 4. Imagem do PIC 18F452 da Microchip.

Abaixo temos principais características do 18F452 utilizado em nosso projeto:

- 40 pinos podendo ter até 34 I/O (*Input/Output* digital);

- 8 canais A/D de 10 Bits, multiplexados para um conversor;
- 02 Módulos CCP – capture, compare e PWM;
- Memória de Programa *Flash* – 32K;
- Memória RAM – 1536 *bytes*;
- Memória EEPROM – 256 *bytes*;
- Velocidade de processamento – até 10MIPS;
- Módulo MSSP (*Master Synchronous Serial Port*);
- Módulo USART; - Possibilita até 100.000 ciclos de escrita/leitura na memória de programa;

O PIC 18F452 possui cinco PORT's: PORTA, PORTB, PORTC, PORTD e PORTE. Cada PORT possui pinos com acesso aos periféricos como Conversor Analógico/Digital, Interrupções, I2C, UART, Módulo CCP, SPI, ou podem ser utilizados como I/O de uso geral.

TABELA A1. Funcionalidade dos pinos do microcontrolador PIC18F452.

PINO	FUNÇÃO	TIPO	FUNCIONALIDADE
1	/MCLR / VPP	In-In	Reset externo e programação ICSP
2	RA0 / AN0	I/O e input A/D	I/O digital e entrada do AD0
3	RA1 / AN1	I/O e input A/D	I/O digital e entrada do AD1
4	RA2 / AN2/ Vref-	I/O e input A/D	I/O digital e entrada do AD1
5	RA3/AN3/ Vref+	I/O e input A/D	I/O digital, entrada do AD3 e entrada de referência alta do A/D
6	RA4 / T0CKI	I/O e Input TMR0	I/O digital e entrada do TMR0
7	RA5/AN4/SS/LVDIN	I/O e Inputs	I/O digital, entrada do AD4, entrada do SPI e Detector de LV
8	RE0 / RD / AN5	Fonte	I/O digital, Leitura da Porta Paralela e entrada do AD5
9	RE1 / WR / AN6	Fonte	I/O digital, Escrita da Porta Paralela e entrada do AD6
10	RE2 / CS / AN7	Fonte	I/O digital, Seleção da Porta Paralela e entrada do AD7
11,32	VCC	Fonte	Positivo da Fonte de Alimentação
12,31	GND	Fonte	Negativo da Fonte de Alimentação
13	OSC1 / CLK1	Input	Entrada do Cristal e entrada do Clock externo
14	Osc2 / CLK1 / RA6	I/O e Inputs	I/O digital, Saída do Cristal e saída do Clock externo
15	RC0/T10S0/T1CK1	I/O Out e In	I/O digital, saída do 2º oscilador e entrada do contador externo Timer1/Timer3
16	RC1/T10S1/CCP2	I/O In e Out	I/O digital, entrada do 2º oscilador e saída do Módulo CCP2
17	RC2 / CCP1	I/O e Out	I/O digital e saída do Módulo CCP1
18	Rc3 / SCK / SCL	I/O, I/O e I/O	I/O digital, in e out do Clock serial para modo SPI e in/out do Clock serial para modo I <sup>2</sup> C
19	RD0 / PSP0	I/O e I/O	I/O digital e Porta de Comunicação Paralela
20	RD1 / PSP1	I/O e I/O	I/O digital e Porta de Comunicação Paralela
21	RD2 / PSP2	I/O e I/O	I/O digital e Porta de Comunicação Paralela
22	RD2 / PSP3	I/O e I/O	I/O digital e Porta de Comunicação Paralela
23	RC4 / SD1 / SDA	I/O e I/O	I/O digital e Porta de Comunicação Paralela
24	RC5 / SD0	I/O e I/O	I/O digital e saída de dados SPI
25	RC6 / TX / CK	I/O e I/O	I/O digital, Transmissão UART e Clock de sincronismo UART
26	RC7 / RX / DT	I/O e I/O	I/O digital, Recepção UART e Dados do UART
27	RD4 / PSP4	I/O e I/O	I/O digital e Porta de Comunicação Paralela
28	RD5 / PSP5	I/O e I/O	I/O digital e Porta de Comunicação Paralela
29	RD6 / PSP6	I/O e I/O	I/O digital e Porta de Comunicação Paralela
30	RD7 / PSP7	I/O e I/O	I/O digital e Porta de Comunicação Paralela
33	RD0 / INT0	I/O e In	I/O digital e entrada de Interrupção Externa 0
34	RD0 / INT1	I/O e In	I/O digital e entrada de Interrupção Externa 1
35	RD0 / INT2	I/O e In	I/O digital e entrada de Interrupção Externa 2
36	RB3 / CCP2	I/O e I/O	I/O digital Módulo CCP2
37	RB4	I/O e In	I/O digital e entrada de Interrupção por Mudança de Estado
38	RB5 / PGM	I/O e In	I/O digital, Interrupção por Mudança de Estado e Habilita ICSP baixa tensão
39	RB6 / PGC	I/O e In	I/O digital, Interrupção por Mudança de Estado e ICSP in-circuit Debugger
40	RB7 / PGD	I/O e In	I/O digital, Interrupção por Mudança de Estado e ICSP in-circuit Debugger

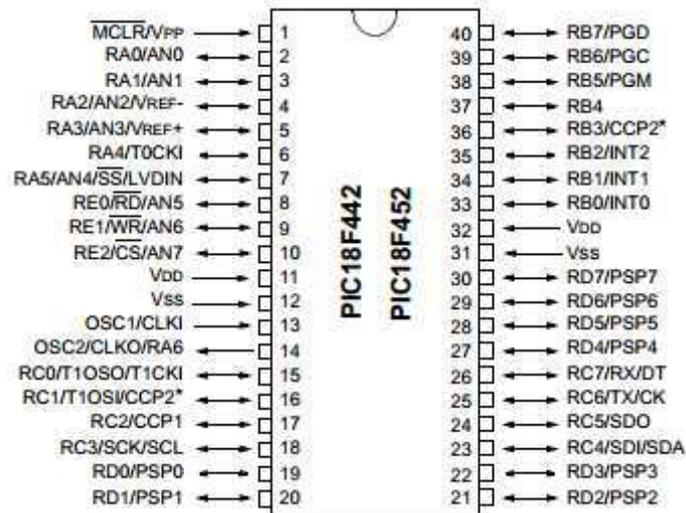


Fig. A1. 5. Diagrama dos pinos do PIC 18F452.

O processador do PIC é bastante simples em termos de instruções, e cabe ao *software* agregar complexidade usando estas instruções existentes. O núcleo do microcontrolador pode mover dados entre os registradores (F) e o registrador principal (W), entre a ROM e o registrador principal. Pode também acionar e desativar bits em qualquer uma das posições de memória. Devido a sua simplicidade, somente uma operação pode ser executada por vez (ciclo de máquina). Em condições normais de operação, cada ciclo de máquina equivale a 4 ciclos de *clock*.

## A1.2. ESTRUTURA INTERNA DO MICROCONTROLADOR PIC 18F452

Nos microcontroladores PIC temos os GPR (*General Purpose Registers*) que são os registradores de usos gerais que nada mais são do que variáveis criadas pelo programador – dados voláteis. Temos também os SFR (*Special Function Registers*) que são os Registradores de uso específico que na verdade contém o SETUP do microcontrolador – configura como irão trabalhar determinados periféricos como PWM, Conversores A/D, USART, etc. O microcontrolador 18F452 possui memória RAM de 1536 *bytes* sendo dividido em 16 bancos de 256 *bytes* de memória cada um.

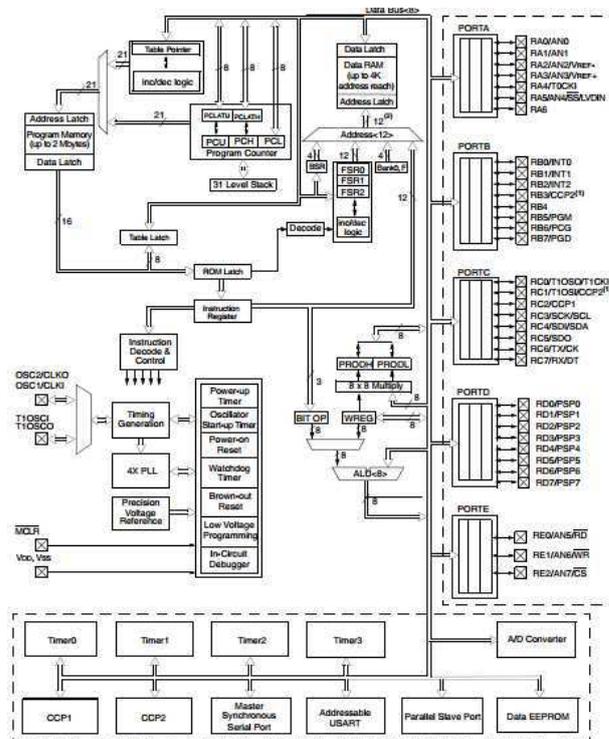


Fig. A1. 6. Diagrama de blocos microcontrolador PIC 18F452.

### A1.2.1 A CPU

A CPU, ou unidade central de processamento, coordena todas as atividades dentro do microcontrolador. Ela organiza a execução das instruções, realizam as operações lógicas matemáticas sobre os dados, e envia os resultados para os diversos registros ou portas de entradas e saída.

#### A1.2.1.1 UNIDADE LÓGICA/ ARITMÉTICA (ALU)

A ALU é usada para realizar operações lógicas e aritméticas definidas no conjunto de instruções da CPU. Vários circuitos programam as operações aritméticas binárias decodificadas pelas instruções e fornecem dados para a execução da operação da ALU. A maioria das operações aritméticas binárias é baseada em algoritmos de adição e subtração (adição com o valor negativo). A multiplicação é realizada com uma série de adições e deslocamento com a ALU sob controle lógico da CPU.

#### A1.2.1.2 SINCRONISMO DE *CLOCK* E CONVERSOR A/D

O *clock* é responsável pelo sincronismo entre todas as operações do microcontrolador. Todos os eventos que ocorrem dentro de um microcontrolador obedecem a uma lógica

preestabelecida pelo fabricante e são processados em tempos determinados pela frequência do *clock*.

Normalmente, quanto maior a frequência de *clock* de um microcontrolador, mais rápida é a execução das instruções. O *clock* também é utilizado como referência de tempo para execução de tarefas que devem ser repetidas em um determinado intervalo de tempo, como por exemplo, a leitura de sinais em interfaces RS232. O conversor A/D do PIC 18F452 é acionado por um sinal de *clock* que pode ser uma fração da frequência do oscilador principal, ou por um oscilador RC interno ao módulo conversor A/D.

#### **A1.2.1.3 MEMÓRIA DE DADOS**

A memória de dados é normalmente implementada na forma de RAM (memória de acesso aleatório), em que podemos ler e gravar com facilidade. A leitura não é destrutiva, ou seja, podemos ler repetidas vezes o valor de uma posição de memória que o valor não se altera. A gravação de um dado da RAM é feita pela CPU, em resposta as instruções colocadas pelo programador. Normalmente os microcontroladores se utilizam de pequenas quantidades de memória de dados, principalmente se compararmos com as quantidades de memória RAM utilizadas por computadores pessoais de hoje, algo como 100 *bytes* para os microcontroladores, versus 512 milhões de *bytes* de um típico computador pessoal.

#### **A1.2.1.4 MEMÓRIA DE PROGRAMA**

Nos microcontroladores, o programa deve residir em uma memória somente de leitura. O programa é normalmente gravado, apenas uma vez, e a partir daí o microcontrolador executa somente este programa. O programa é normalmente gravado, apenas uma vez, e a partir daí o microcontrolador executa somente este programa.

A maioria dos microcontroladores se utiliza de memória EPROM, que para ser apagada necessita ser exposta a luz ultravioleta, ou PROM. No caso da PROM o programa só pode ser gravado apenas uma única vez, e a partir daí o microcontrolador executa apenas este programa. Para podermos conhecer mais sobre os recursos da família PIC, foi adotado como base desse projeto um modelo bastante poderoso, que agrupe de uma só vez o maior numero possível de recursos disponíveis.

### A1.2.1.5 PORTAS DE ENTRADAS E SAÍDAS

Os demais pinos são conhecidos por I/Os. Estas I/Os são agrupadas em PORTs (portos), de no máximo 8 pinos cada. Há um total de 33 I/Os disponíveis, que podem ser configuradas como entradas ou saídas em tempo de execução. Quando um pino é configurado como ENTRADA, ele pode ser conectado a algum sensor para detectar sinais digitais através de variação da tensão de 0 e 5V. Quando um pino é configurado como saída, o programa poderá acioná-lo, e com isso gerar uma corrente baixa (max. 20 mA) com os níveis de tensão de 0V ou 5V.

## A2. RELÓGIO EM TEMPO REAL – RTC

RTC (RELÓGIO EM TEMPO REAL) O *Real Time Clock* I2C DS1302 é um relógio/calendário serial de baixo custo controlado por um cristal externo de 32.768 Hz. A comunicação com o DS1302 é através de interface serial I2C (SCL e SDA). Oito *bytes* de RAM do RTC são usados para função relógio/calendário e são configurados na forma *Binary Coded Decimal* – BCD. É possível a retenção dos dados na falta de energia utilizando uma bateria de lítio de 3V - 500mA/h conectada ao pino 3.

Para representar números decimais em formato binário, o relógio DS1302, utiliza o código BCD, que incrementa a parte alta do *byte* hexadecimal quando o número da parte baixa é maior que 9. Isto é possível somando 6 (0110b) ao resultado maior que 9. Este código facilita a transmissão de dados e a compreensão do tempo, tendo em vista que em formato hexadecimal, apresenta o valor em decimal.

Para iniciar o relógio DS1302, após o *power-on*, é necessário incrementar os segundos quando estiverem todos os registros da RAM em zero. A bateria GP 3.6V garante o funcionamento do relógio e também o processamento do PIC18F452.

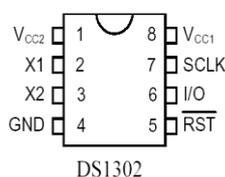


Fig. A2. 3. Diagrama dos pinos do DS 1302.

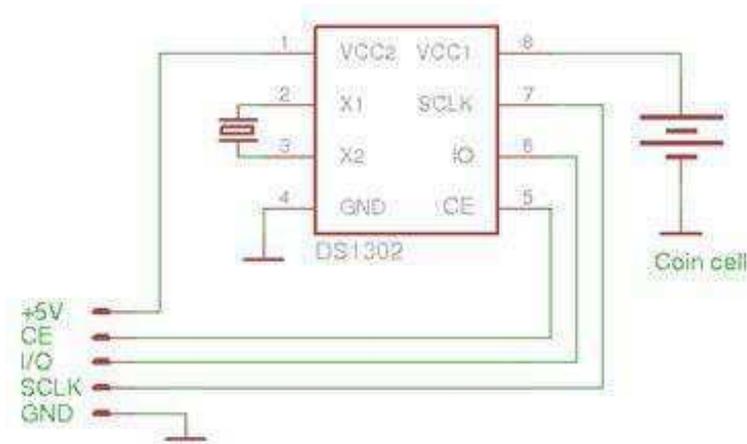


Fig. A2. 4. Circuito de interligação do DS 1302.

### A3. SENSOR DHT11

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 DHT11 oferece saídas digitais calibrado para temperatura e umidade, mas é relativamente muito mais barato do que outros do mercado. O sensor DHT11 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.

O sensor DHT11 vem em um pacote de quatro pinos única linha e opera a partir de 3,5 a fonte de alimentação 5.5V. Pode medir a temperatura 0-50°C com uma precisão de  $\pm 2^\circ\text{C}$  e umidade relativa variando 20-95% com uma precisão de  $\pm 5\%$ . O sensor fornece totalmente calibrado saídas digitais para as duas medições. Ele tem seu próprio protocolo *1-wire* proprietário, e, portanto, a comunicação entre o sensor e um microcontrolador não é possível através de uma interface direta com qualquer um de seus periféricos. O protocolo deve ser implementado no *firmware* do MCU com *timing* exato exigido pelo sensor.

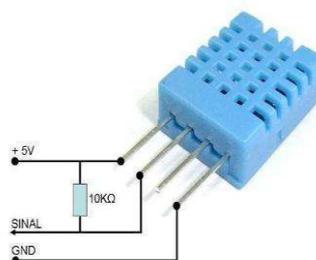


Fig. A3. 3. Circuito de interligação do sensor DHT11.

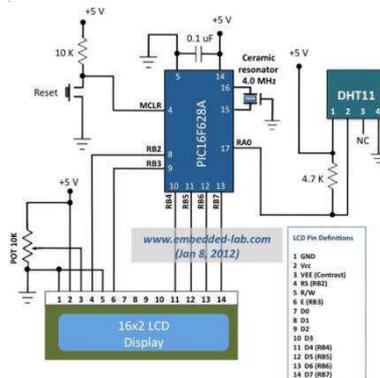


Fig. A3. 4. Circuito de interligação do DHT11 no PIC 16F628A.

## A4. COMUNICAÇÃO SERIAL RS-232

O padrão RS-232 é uma dos mais difundidos no mundo da automação e controle. Hoje em dia muitos equipamentos fazem uso do mesmo. O tipo de transmissão é serial, ou seja, transmitimos os *bytes* através de uma única via bit a bit.

Este método permite que seja utilizado um único fio para a transmissão/recepção ou dois fios, uma para transmissão e outro para recepção, dependendo do caso. E devido aos níveis de tensão estabelecidos na norma a distância de transmissão (tamanho do cabo) pode chegar a 45 metros.

Os sinais elétricos na porta serial (RS-232) possuem níveis de tensão entre +15VCC e -15VCC. Na figura abaixo, temos a representação de um sinal RS-232 na transmissão de um *byte*. Na RS-232 o “1” lógico tem nível de tensão entre -15VCC à -3VCC e o “0” lógico tem nível entre +3VCC à +15VCC.

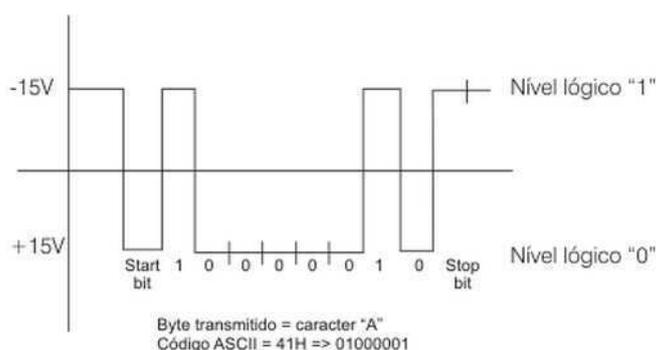


Fig. A4. 4. Sinal RS-232 na transmissão de um *byte*.

A maioria dos microcontroladores disponíveis no mercado possui uma USART (*Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter*). Um exemplo é o microcontrolador PIC18F452. Sua 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.

Externamente esta USART se comunica com o mundo exterior através de dois pinos, o TX e RX. Um outro ponto importante sobre os pinos do PIC é que quando utilizamos a USART interna, os pinos RB1 e RB2 não podem mais ser utilizados como pinos de I/O comuns (digitais).

Note que os níveis utilizados pelo PIC são os níveis TTL enquanto o utilizado pelo PC é o RS232. Para compatibilizar um nível ao outro, é necessário um conversor de níveis de TTL para RS232 e vice-versa. Um conversor muito popular hoje no mercado é o MAX232.

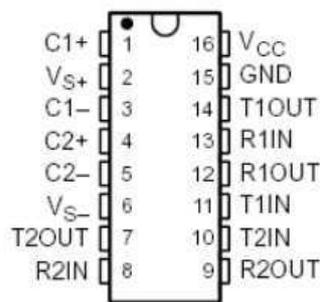


Fig. A4. 5. Circuito integrado MAX232.

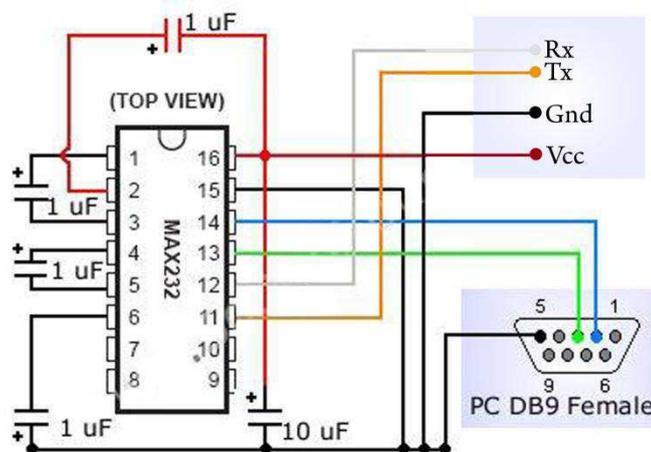


Fig. A4. 6. Exemplo de comunicação serial RS 232 com PIC.