



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica
Projeto de Engenharia Elétrica



**MEDIDOR DE CORRENTE DE FUGA BASEADO EM
MICROCONTROLADOR APLICADO A PÁRA-RAIOS DE
ÓXIDO DE ZINCO**

Euler Cássio Tavares de Macedo

Campina Grande, Fevereiro de 2009



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica

MEDIDOR DE CORRENTE DE FUGA BASEADO EM MICROCONTROLADOR APLICADO A PÁRA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à
Coordenação de Graduação em Engenharia
Elétrica da UFCG, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

**Orientador: Prof. Dr. José Gutemberg de
Assis Lira**

Campina Grande, Fevereiro de 2009

Euler Cássio Tavares de Macedo

**MEDIDOR DE CORRENTE DE FUGA BASEADO EM
MICROCONTROLADOR APLICADO A PÁRA-RAIOS DE
ÓXIDO DE ZINCO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação de Graduação em Engenharia
Elétrica da UFCG, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em _____ de _____ de 2009.

Banca Examinadora

Orientador: José Gutemberg de Assis Lira.

Examinador: Raimundo Carlos Silvério Freire.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao Grande Arquiteto do Universo por toda a força e coragem para vencer tantos obstáculos que surgiram neste período de graduação em Engenharia Elétrica.

Para a realização deste sonho de ser um Engenheiro Eletricista contei com o apoio de inúmeras pessoas e instituições, mas gostaria particularmente de destacar e agradecer:

- A minha família em geral, em especial a minha mãe Maria Verônica e meu pai José Costa de Macedo (em memória).
- Aos queridos mestres Edson Guedes da Costa, José Gutemberg de Assis Lira, Raimundo Carlos Silvério Freire, Glauco Fontgalland, Benedito Antonio Luciano, Eurico Bezerra de Souza Filho e todos os outros professores que contribuíram de maneira direta e indiretamente para o meu crescimento pessoal e intelectual.

"If I have been able to see further, it was only because I stood on the shoulders of giants"

Isaac Newton

- A Universidade Federal de Campina Grande, e em especialmente a Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica, por toda a excelente estrutura de ensino e apoio aos estudantes, em Especial a Sra. Adail Silva Paz .
- Ao Instituto Nacional Politécnico de Grenoble – INPG/ESISAR – França, que conjuntamente com a UFCG me proporcionaram uma experiência inesquecível de intercambio escolar internacional.
- Ao Laboratório de Alta Tensão - LAT e o Laboratório de Instrumentação e Metrologia Científica – LIMC, por todo o período de utilização de suas dependências.
- Aos meus inúmeros queridos amigos e colegas que compartilharam varias horas de aula, muitas provas e muitas horas sem dormir por causa dos estudos, especialmente Stenio Freire, Glauber Roncally, Renato Bruno, Diogo Marcel, Iturialde e tantos outros queridos e queridas.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	6
Lista de tabelas	8
RESUMO	9
ABSTRACT	10
1. Introdução	11
2. Pára-raios de Oxido de Zinco	13
2.1 - Metodologia	15
3. Condicionamento dos sinais	18
4. Sensor de corrente de fuga	20
4.1 Resultados	26
5 Analisador de espectro	30
5.1. Digitalização do sinal analógico	30
5.2. Descrição Funcional	31
5.3. Processamento da informação adquirida	32
5.4. Análise harmônica do sinal	32
5.5. O Algoritmo de Goertzel	33
5.6. Hardware desenvolvido	36
5.6.1. Desenvolvimento da placa de aquisição de dados dedicada ao microcontrolador PIC.....	37
5.6.2. Implementação da placa secundária do sistema de aquisição de dados	38
5.6.3 Criação do layout da placa primária.	39
5.6.4. Criação do layout da placa secundária.	39
5.6.5. Placa de aquisição de dados dedicada ao microcontrolador PIC.....	41
5.6.6. Placa secundária do sistema de aquisição de dados	42
5.6.7. Testes realizados.....	43
6 Considerações Finais	49
Bibliografia	50

Lista de Figuras

A lista abaixo apresenta o título de cada figura utilizada na elaboração deste trabalho.

Figura 1: Exemplo da instalação de um para-raio.....	12
Figura 2: Curva característica de um pára-raios tipo ZnO	13
Figura 3: Modelo elétrico do pára-raios de ZnO.....	14
Figura 4: Diagrama fasorial.modulação em quadratura.....	16
Figura 5: Separação do circuito condicionador em três estágios distintos.....	17
Figura 6: Corrente de magnetização (a) e tensão de saída (b).....	19
Figura 7: Laço de Histerese do Núcleo N3E3, 60Hz.....	19
Figura 8: Diagrama do fluxo magnético e da conversão corrente-tensão.....	20
Figura 9: Diagrama esquemático do elemento sensor de corrente.....	21
Figura 10: Diagrama funcional do sensor de corrente de fuga.....	22
Figura 11: Esquemático Elétrico do sensor de corrente.....	22
Figura 12: Projeto da placa de circuito impresso do sensor de corrente proposto.....	23
Figura 13: Fotografia do sensor de corrente desenvolvido.....	24
Figura 14: Esquema utilizado nas medições.....	25
Figura 15: Resultado obtido com a aplicação de uma onda triangular.....	25
Figura 16: Resultado obtido com a aplicação de uma onda do tipo Sinc(t).....	26
Figura 17: Medição da Corrente de Fuga em um para-raio em 230 kV.....	27
Figura 18: Medição da Corrente de Fuga em um para-raio em 230 kV.....	27
Figura 19: Representação esquemática do procedimento realizado pelo sistema de aquisição de dados.....	29
Figura 20: Diagrama de fluxo de um sistema com resposta impulsional.....	32
Figura 21: Diagrama de fluxo de um sistema com resposta impulsional implementada.....	33
Figura 22: Diagrama elétrico das fontes de tensão desenvolvidas.....	34
Figura 23: Diagrama elétrico da “placa primária”	35

Figura 24: Placa de desenvolvimento secundária.....	36
Figura 25: Layout desenvolvido para a placa primária.....	37
Figura 26: Layout desenvolvido para a placa secundária.....	37
Figura 27: Diagrama de blocos do circuito desenvolvido.....	38
Figura 28: Fotografia do circuito implementado.....	38
Figura 29: Fotografia destacando a construção da placa primaria.....	39
Figura 30: Fotografia da placa secundaria para apresentação dos resultados.....	40
Figura 31: Arranjo experimental utilizado para analise espectral de sinais.....	41
Figura 32: Onda quadrada digitalizada pelo microcontrolador – 1 ciclo.....	42
Figura 33: Comparativo das DFT simulada no Matlab® e a DFT experimental.....	42
Figura 34: Onda triangular digitalizada pelo microcontrolador – 1 ciclo.....	43
Figura 35: Comparativo das DFT simulada no Matlab® e a DFT experimental.....	43
Figura 36: Arranjo experimental utilizado para medição digital de fase.....	44
Figura 37: Medição de defasamento utilizando $C= 0.22\mu\text{F}$	46
Figura 38: Medição de defasamento utilizando $C= 0.33\mu\text{F}$	46
Figura 39: Medição de defasamento utilizando $C= 0.55\mu\text{F}$	46

Lista de Tabelas

Tabela 1: Medição de defasamento realizado pela metodologia proposta.....	45
Tabela 2: Medição de defasamento realizado pela metodologia proposta.....	45

RESUMO

Os pára-raios a base de ZnO são equipamentos utilizados na proteção contra sobretensões atmosféricas e de manobra em subestações e linhas de transmissão. Eles são formados por varistores, elementos que apresentam alta não-linearidade entre a tensão e a corrente. Os pára-raios apresentam degradação com o tempo, seja com a própria tensão da rede ou por sobretenões. O monitoramento contínuo da intensidade da corrente de fuga pode indicar falhas permanentes ou atuações momentâneas do pára-raios, enquanto que a análise de suas componentes harmônicas indica o grau de degradação do equipamento ou algumas falhas. A medição e análise harmônica da corrente de fuga têm sido usadas no diagnóstico do estado de degradação dos pára-raios de óxido de zinco (ZnO).

Para o desenvolvimento deste trabalho, partiu-se de um estudo bibliográfico sobre os pára-raios de ZnO, desde sua construção física até o seu comportamento em operação no sistema elétrico de potência.

Baseados na literatura existente a cerca do tema proposto, desenvolveu-se protótipos dos circuitos necessários para se realizar o monitoramento contínuo da corrente de fuga que circula no pára-raios, ou seja, foram desenvolvidos circuitos de um condicionador de sinais, sensor de corrente, analisador de espectro.

O circuito condicionador de sinais é destinado a realizar a adequação dos níveis de tensão e corrente a serem processados, o circuito sensor de corrente é o responsável por fornecer em sua saída uma tensão proporcional a corrente de fuga que circula no pára-raios e por fim, temos o analisador de espectro que realiza todas as operações matemáticas e análise harmônica dos sinais de tensão e corrente obtidos a partir do pára-raios.

Por fim, apresentam-se os resultados obtidos nas simulações e nas montagens experimentais, sugerindo algumas sugestões para futuros trabalhos.

Palavras-chave: Análise Harmônica, Corrente de Fuga, Pára-raios de ZnO.

ABSTRACT

Surge arresters are equipments of greater importance for the power electrical systems protection. Their task is avoiding switching and atmospheric surges to reach equipments like power transformers. A failure in a surge arrester result in the exposure of the electrical system equipments to electrical surges leading to a complete turn off of the system or even the surge arrester explosion. To avoid this problem, the maintenance of these equipments is made by means of regular monitoring.

Measurement of the resistive leakage current and analysis of its harmonic components is one of the most used techniques to evaluate the degradation level of metal oxide surge arresters. This measurement requires the samples acquisition of the voltage applied on the arrester and its leakage current samples what is not a simple task to achieve when the arrester is operating on field. This text presents a new device based on microcontroller PIC® to provide the measurement of the harmonic components of the resistive leakage current in a surge arrester. As main characteristics, this device presents a low cost and simplicity to be set on field equipments.

Index Terms--. Harmonic analysis, leakage current, zinc oxide, varistor.

1. Introdução

Em sistemas de potência podem ocorrer sobretensões de níveis de intensidade muito superiores à tensão nominal do sistema, variando não só de intensidade como também em tempo de duração. Caso os sistemas não apresentassem dispositivos de proteção contra sobretensões seria necessário que a classe de isolamento dos equipamentos de alta tensão fosse bastante elevada, acarretando em aumento substancial nos custos dos equipamentos.

Os pára-raios a base de ZnO são utilizados com a finalidade de reduzir com segurança a classe de isolamento dos equipamentos. Eles são formados por varistores que apresentam como característica uma alta não-linearidade entre a tensão e a corrente.

Contudo, os pára-raios apresentam degradação com o tempo, seja com a própria tensão da rede ou por sobretensões. Dessa maneira devido a sua grande importância para os sistemas elétricos torna-se necessário a busca de dispositivos capazes de fazer o seu monitoramento. O monitoramento contínuo da intensidade da corrente de fuga pode indicar falhas permanentes ou atuações momentâneas do pára-raios, enquanto que a análise de suas componentes harmônicas indica o grau de degradação do equipamento ou algumas falhas. A medição e análise harmônica da corrente de fuga têm sido usadas no diagnóstico do estado de degradação dos pára-raios de óxido de zinco (ZnO).

Nos sistemas de transmissão, os pára-raios de ZnO são diretamente instalados entre a fase e terra. Desse modo, mesmo em condições normais de operação, uma pequena corrente de fuga no sentido do aterramento circula continuamente pelos varistores de ZnO. A corrente de fuga de um pára-raios pode ser dividida em duas componentes: resistiva e capacitiva. A medição e análise harmônica da componente resistiva têm sido usadas como parâmetros no monitoramento dos pára-raios de óxido de zinco.

Pesquisas mostram que o uso contínuo de um pára-raios de óxido de zinco pode provocar um aumento gradual da componente resistiva da corrente de fuga com o passar do tempo, aumento este que pode conduzir à instabilidade térmica do equipamento, ocasionando até sua falha por completo.

Baseado nesta necessidade este projeto tem como objetivo desenvolver um instrumento portátil, de baixo custo e capaz de realizar a medição e análise harmônica da corrente de fuga que circula nos pára-raios.

Para atingir os objetivos propostos na pesquisa e no Trabalho de Conclusão de Curso este trabalho foi composto por seis capítulos, sendo abordado o estudo e desenvolvimento de um medidor de corrente de fuga baseado em microcontrolador aplicado a pára-raios de óxido de zinco.

O Capítulo 2 apresenta uma curta revisão bibliográfica apresentando um estudo descritivo sobre os pára-raios de ZnO, desde a sua construção física até o modelamento matemático aplicável à análise da medição da corrente de fuga.

O Capítulo 3 apresenta o desenvolvimento de um circuito condicionador de sinais utilizado na adequação dos níveis de sinais de tensão e corrente para a entrada no dispositivo de monitoramento proposto.

Na continuidade do trabalho, apresenta-se no Capítulo 4 o sensor de corrente desenvolvido, apresentando desde a formulação matemática até os protótipos construídos em laboratório, terminando com a apresentação de alguns resultados experimentais.

O Capítulo 5 é feita a descrição detalhada do sistema analisador de espectro responsável pela aquisição e análise harmônica dos sinais de tensão e corrente.

Por fim, no Capítulo 6 é feita uma conclusão do trabalho desenvolvido, e adicionalmente, apresenta-se algumas sugestões para pesquisas futuras.

2. Pára-raios de Oxido de Zinco

Os pára-raios de oxido de zinco (ZnO) são equipamentos largamente utilizados em sistemas elétricos de potência. Os pára-raios têm como principal função limitar sobretensões ou surtos no sistema elétrico (ex. manobras ou descargas atmosféricas), atuando de forma a impedir que valores de tensão acima de um determinado nível preestabelecido possam atingir os outros equipamentos da subestação.

Um pára-raios é formado principalmente por elementos resistivos não lineares, conhecidos como varistores. Os pára-raios possuem um invólucro externo (polimérico ou porcelana) garantindo assim, a estanqueidade do equipamento. O contato das pastilhas varistoras com poluentes e umidade pode além de reduzir a vida útil do equipamento, causar o seu incorreto funcionamento.

Nos sistemas de transmissão, os pára-raios de ZnO são diretamente instalados entre a fase e terra. Desse modo, uma pequena corrente de fuga para terra circula continuamente pelos varistores de ZnO. A instalação de um pára-raios de ZnO pode ser ilustrada com o auxílio da Figura 1.



Fig. 1 - Exemplo da instalação de um para-raio de ZnO

Os principais fatores que contribuem para a degradação dos pára-raios são: influência da tensão de operação; descargas de longa duração ou de alta intensidade com curta duração; descargas internas (corona); etc [1].

As principais técnicas de monitoração e diagnóstico utilizadas atualmente são: medição da corrente de fuga; medições termográficas (termovisão) e decomposição harmônica da corrente de fuga que circula no pára-raios, [6, 10, 11, 13, 15, 16].

A deterioração dos elementos varistores provoca, entre outros, o aumento da corrente de fuga resistiva, causando conseqüentemente um aumento principalmente da componente de 3º harmônico do sinal original. Assim, baseado-se na análise do sinal da componente resistiva da corrente de fuga pode-se monitorar e diagnosticar o estado do pára-raios [14, 17].

Na Figura 2 são mostradas as características tensão-corrente típicas do pára-raios de ZnO, como também, os níveis de proteção para impulso atmosférico e de manobra além das tensões nominal e de operação contínua.

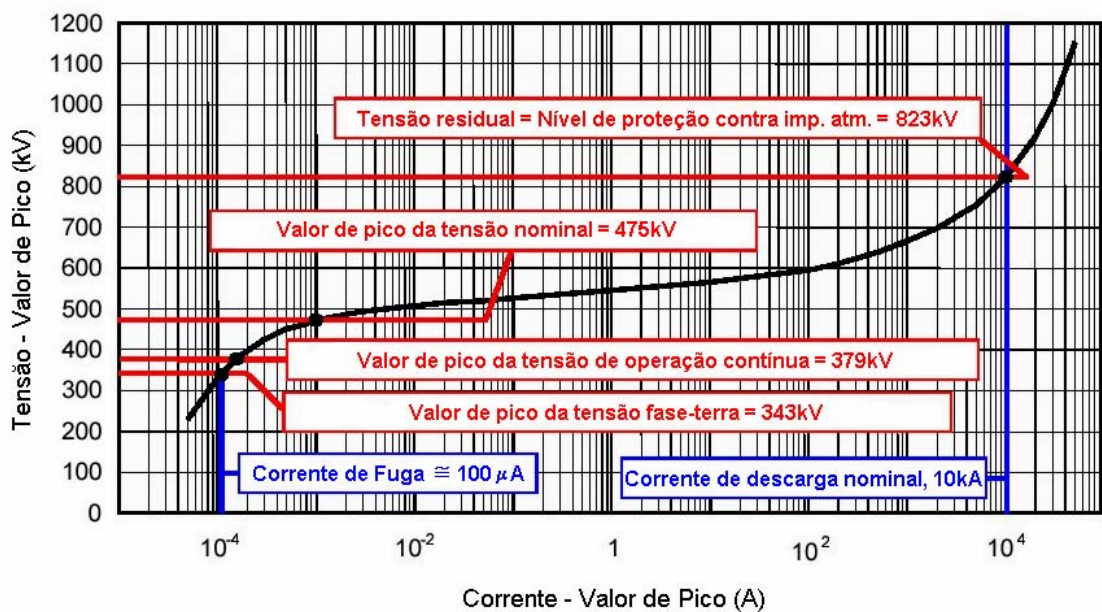


Fig. 2 - Curva característica de um pára-raios tipo ZnO, [14]

Dentre as técnicas de monitoramento existentes, destaca-se a técnica de medição da corrente de fuga e seus harmônicos para a análise do estado de degradação dos pára-raios a ZnO. Um monitoramento contínuo da intensidade da corrente de fuga pode indicar falhas permanentes ou atuações momentâneas do pára-raios, enquanto que a análise de suas

componentes harmônicas indica o grau de degradação do equipamento ou algumas falhas como a entrada de umidade no mesmo [11, 15, 16].

Neste trabalho é proposto um dispositivo de medição de corrente de fuga baseado em microcontrolador, destinado a pára-raios de óxido de zinco e capaz de realizar a separação das componentes resistiva e capacitiva da corrente de fuga, além de efetuar a análise harmônica do sinal, disponibilizando as harmônicas de primeira e terceira ordem.

Os resultados obtidos a partir deste dispositivo podem ser utilizados no diagnóstico do nível de degradação do pára-raios. Adicionalmente, este dispositivo pode ser utilizado para o monitoramento e determinação de tensões e correntes harmônicas presentes em transformadores ou outros equipamentos usados nos sistemas de distribuição de energia elétrica em geral [18].

O dispositivo possibilita ainda o registro em memória da leitura efetuada como também a disponibilidade de uma transmissão de dados sem fio (*wireless*) assim como uma comunicação serial entre o equipamento e um microcomputador e a apresentação em um visor de cristal líquido.

2.1 - Metodologia

Os pára-raios de ZnO, mesmo em excelentes condições de uso, devido as suas características intrínsecas, possuirá sempre uma corrente de fuga fluindo através dos varistores que o compõem. A corrente total que flui pelo pára-raios possui duas componentes (capacitiva e resistiva), conforme apresentado na Figura 3 [17].

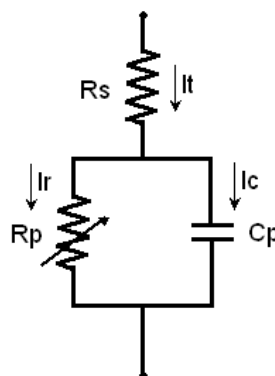


Fig. 3 - Modelo elétrico do pára-raios de ZnO [17].

Onde:

R_s – Resistência dos grãos de ZnO;

R_p – Resistência não-linear da região intergranular dos varistores que compõem o pára-raio;

C_p – Capacitância formada pelos grãos de ZnO.

A corrente resistiva, de característica não-linear é responsável pelas perdas elétricas e pelo envelhecimento dos blocos de ZnO. A corrente resistiva apresenta em condições normais de operação do pára-raios um valor baixo quando comparado a componente capacitiva [11, 15,16].

Para o processamento da informação pelo microcontrolador é necessário inicialmente, que se faça à digitalização do sinal.

Na utilização do equipamento proposto, faz-se necessário a aquisição de dois sinais: o primeiro corresponde ao sinal da corrente de fuga que circula pelo para-raios e o outro compreende o sinal da tensão aplicada no mesmo.

Mais adiante, discutiremos em detalhes o protótipo do sensor de corrente desenvolvido, baseado em um toroide de material nano cristalino que possui como característica a sua alta permeabilidade magnética, característica que viabiliza a medição de sinais de pequena amplitude, como é o caso da corrente de fuga [16].

Os sinais analógicos provenientes do sensor de corrente de fuga e da tensão aplicada ao pára-raios são amostrados inicialmente e convertidos em sinais digitais. O processo de digitalização compreende algumas etapas, dentre as quais, a amostragem, quantização e codificação [5, 9]

Os sinais de entrada do conversor analógico-digital (V_i) foram condicionados por amplificadores operacionais para a adequação a faixa de valores aceitáveis pelo microcontrolador.

O nível do sinal na entrada, V_i do conversor A/D interno ao microcontrolador, usado nesta aplicação, é limitado a uma faixa entre 0-5 V. O sistema desenvolvido amostra níveis de tensão de 0 a 5 volts em uma escala de amplitude de 1024 divisões, correspondendo a $V_i/2N$ com $N=10$, assim, tem-se uma resolução em amplitude da ordem de aproximadamente 5 mV.

A decomposição da corrente de fuga em suas componentes resistiva e capacitiva pode ser compreendida com o auxílio da Figura 4, que mostra que a componente resistiva e capacitiva estão em quadratura, e que a componente resistiva e a tensão aplicada possuem a mesma defasagem.

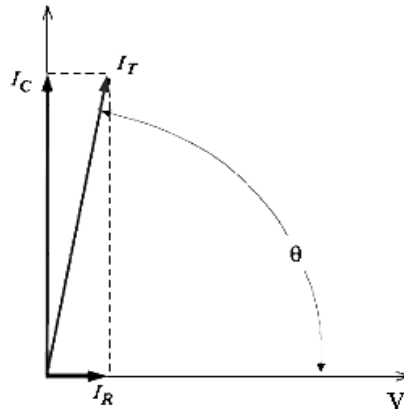


Fig. 4 - Diagrama fasorial da tensão aplicada e a corrente de fuga do pára-raios .

Observando o digrama fasorial, temos que:

$$I_T = I_R + I_C \quad (1)$$

E que a componente resistiva é dada por:

$$I_R = I_T \cos(\theta) \quad (2)$$

Então, pode-se verificar que possuindo-se uma amostra da corrente de fuga que circula no pára-raios, assim como uma amostra da tensão aplicada no mesmo, pode-se obter o defasamento existente entre a corrente de fuga e a tensão aplicada ao pára-raios, possibilitando assim a determinação da componente resistiva da corrente de fuga que circula em pára-raios de ZnO.

3. Condicionamento dos sinais

Por imposição do conversor A/D interno do PIC, os sinais a serem digitalizados necessitam estar compreendidos na faixa de 0-5 V, para tal finalidade, foi necessário desenvolver um circuito condicionador de sinais a ser utilizado na entrada analógica do microcontrolador. Este circuito é capaz de limitar em amplitude assim como, adicionar um nível CC aos sinais alternados (V_i) antes de aplicá-los ao conversor.

O condicionamento evita erros no processamento do sinal causado pela saturação do nível do sinal aplicado. O circuito adicional é composto de três estágios. O primeiro é um buffer com proteção contra tensão superior a ± 15 V que utiliza diodos de sinais. O segundo é composto por um circuito somador com um amplificador operacional, esses circuitos podem ser visualizados com o auxílio das Figuras 5a e 5b.

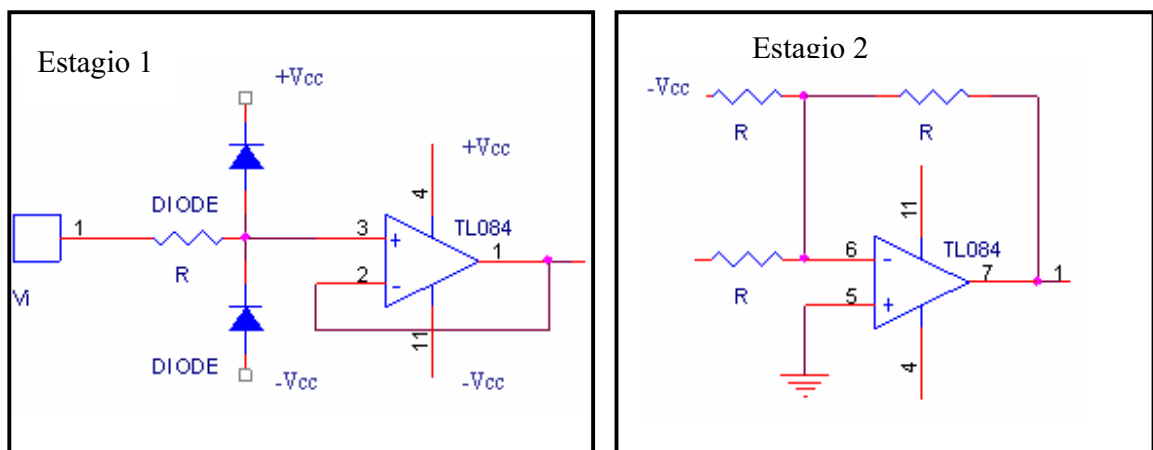


Figura 5 a e b - Circuito Condicionador de Sinais, a) Buffer de Entrada, b) Somador de nível DC

O terceiro estágio é um amplificador operacional configurado como buffer de saída e com limitação de tensão entre 0-5 V (V_o) e utiliza diodos de sinais, estes diodos têm a finalidade de protegerem o conversor A/D do microcontrolador contra sobretensões.

O circuito eletrônico do 3º estágio é apresentado com o auxílio da Figura 5c.

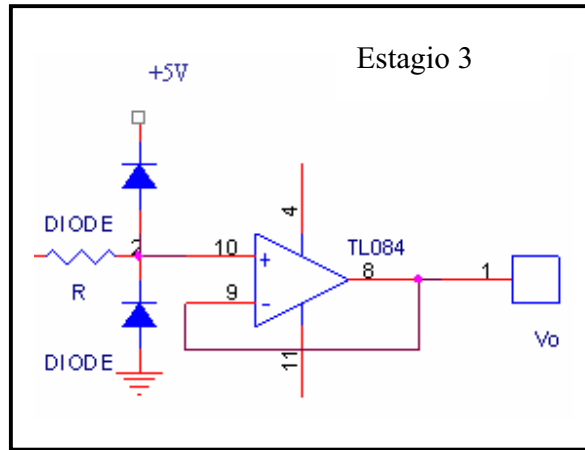


Fig. 5 - Circuito Condicionador de Sinais, c) Buffer de saída.

Para tensões superiores a estes valores pode-se fazer uso de divisores de tensão, normalmente utilizados em sistemas de medição para amostragem de valores de tensão.

4. Sensor de corrente de fuga

Um sensor de corrente de fuga é um dispositivo que permite medir a corrente que circula nas pastilhas varistoras deste equipamento no sentido do aterramento quando o mesmo encontra-se energizado. Assim, o sensor de corrente de fuga do pára-raios de óxido de zinco deve possuir propriedades e características elétricas bem definidas para a realização da função proposta. Ou seja, a sua sensibilidade e linearidade são alguns dos parâmetros que devem ser enfatizados, uma vez que dependem deles todas as análises e informações para o processamento e diagnóstico posterior. Entretanto, cuidados devem ser observados com o ponto de operação sobre a curva de histerese e saturação destes sensores magnéticos a fim de evitar problemas de não linearidade.

Baseado nos resultados experimentais realizados por [16], optou-se na utilização de sensores de corrente baseado em toroides constituídos de material nanocristalino, mais especificamente no núcleo toroidal N3E3 fabricado a partir da liga (FeSiBNbCu) baseada em nanocristais de 10nm e fabricado pela Mecagis, esse núcleo possui dimensões físicas 40x25x15 ((De x Di x H) em mm) e uma permeabilidade relativa μ_r de 185707.

Em seguida, com o auxílio das Figuras 6 e 7 apresenta-se a tensão de saída em função da corrente de magnetização e a curva de histerese para este núcleo respectivamente.

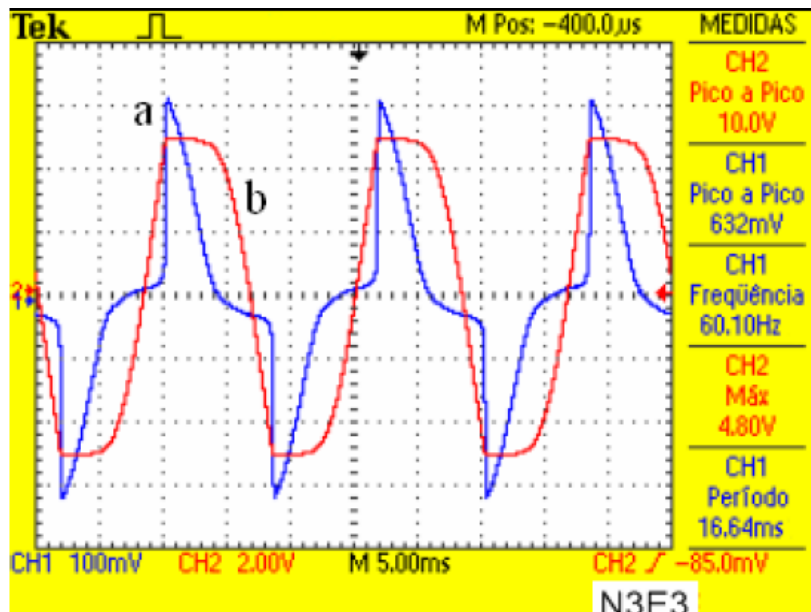


Fig. 6 - Corrente de magnetização (a) e tensão de saída (b).

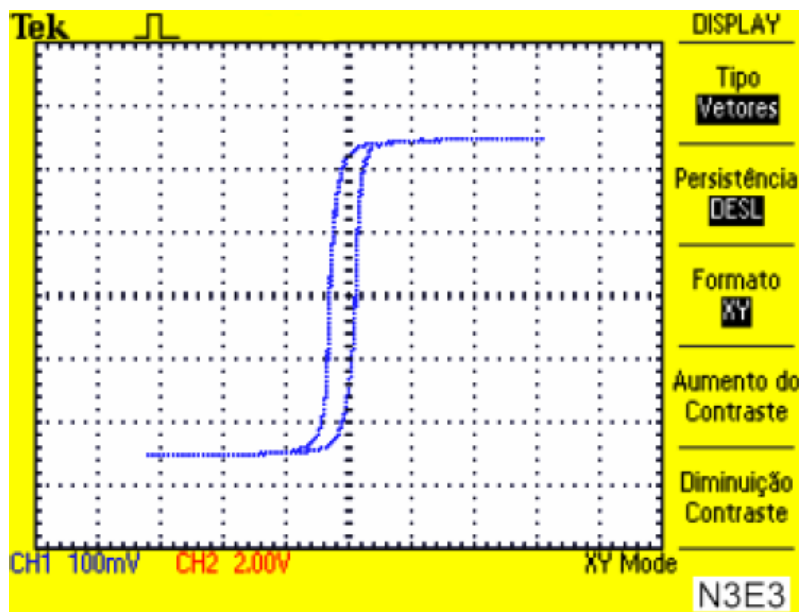


Fig. 7 - Laço de Histerese do Núcleo N3E3, 60Hz.

Analisando a Figura 7, pode-se verificar que este tipo de material apresenta uma curva de histerese com área interna relativamente pequena, esta região representa as perdas por histerese existente no material, pode-se verificar que essa região é menor quando comparada com outros materiais ferromagnéticos [16].

Em seguida, apresenta-se esquematicamente a maneira na qual o sensor de corrente é constituído, pois o mesmo é baseado no estudo da Lei de Faraday, sendo o

princípio básico baseado na obtenção de uma tensão diretamente proporcional à intensidade da corrente que circula nos pára-raios, com essa finalidade, realiza-se a medição da intensidade de campo magnético H da corrente de fuga I_T , que é induzida no cabo conectado à malha de terra. Esse conceito é exemplificado com o auxílio das Figuras 8a e 8b.

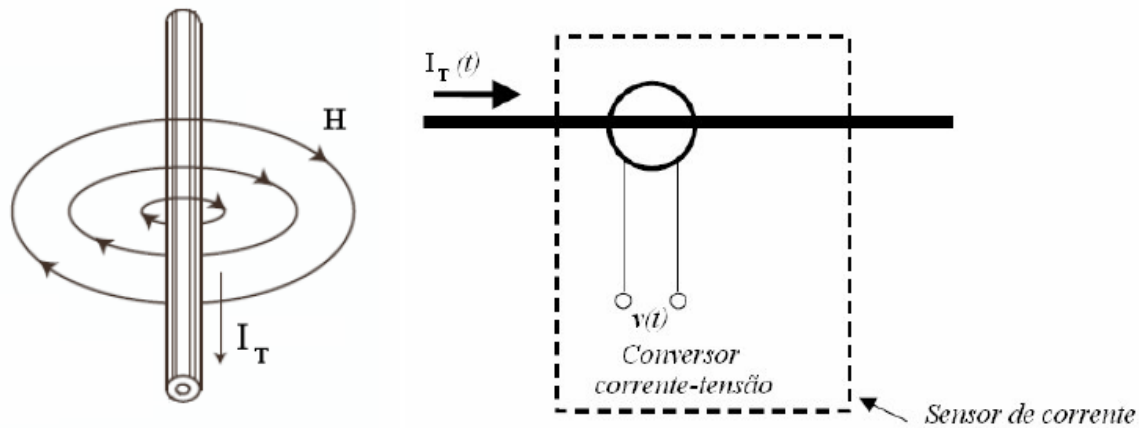


Fig. 8a e 8b - Diagrama do fluxo magnético e da conversão corrente-tensão.

Podemos verificar, que segundo a lei de Faraday, um campo magnético variável produz uma força eletromotriz capaz de fazer circular uma corrente em um determinado circuito fechado, obtendo assim em um enrolamento secundário uma tensão induzida.

Considerando a formulação a seguir:

$$V_s = N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (3)$$

Sendo A a área da seção magnética do núcleo toroidal, temos que o fluxo magnético ϕ é dado pela Equação 4.

$$\phi = B.A \quad (4)$$

Derivando a Equação 4, obtemos:

$$\frac{d\phi}{dt} = A. \frac{dB}{dt} = \mu A \frac{dH}{dt} \quad (5)$$

Aplicando a Lei de Ampère, obtemos a seguinte equação:

$$H = \frac{N_1 \cdot I_T}{l} \quad (6)$$

Derivando a Eq. (6), obtemos:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{N_1}{l} \cdot \frac{dI_T}{dt} \quad (7)$$

Substituindo a Eq.(7) na Eq.(5) e em seguida na Eq.(3), obtemos que a tensão V_s é proporcional a derivada da corrente de fuga I_T .

$$V_s = N_2 \frac{d\phi}{dt} = \left[\frac{\mu AN_1 N_2}{l} \right] \cdot \frac{dI_T}{dt} \quad (8)$$

Como apresentado, para ter-se uma tensão de saída V_s proporcional a corrente de fuga que circula em um pára-raios faz-se necessário a utilização de um circuito integrador, esse conceito pode ser exemplificado com a ajuda da Figura 9.

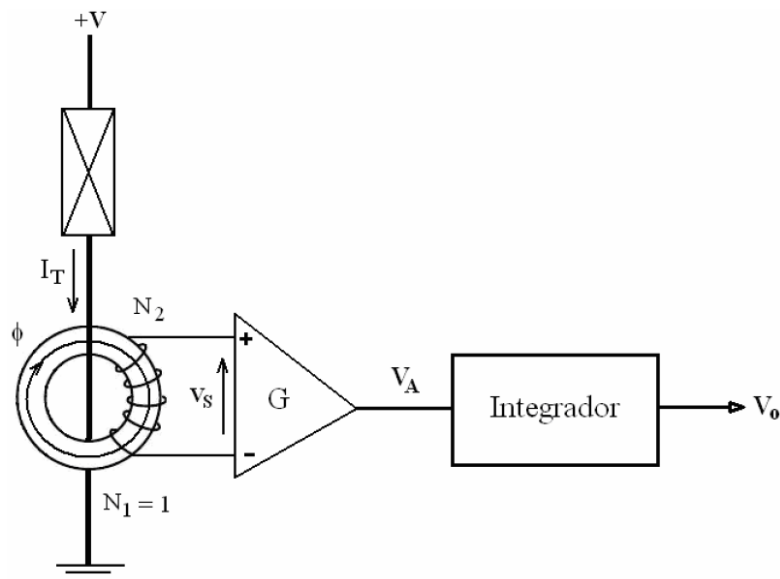


Fig. 9 - Diagrama esquemático do elemento sensor de corrente [16].

Como a corrente de fuga trata-se de um sinal relativamente de pequena amplitude optou-se na implementação física do circuito pela utilização de um amplificador de instrumentação INA101 que permite eliminar o ruído de modo comum e dessa maneira possibilitar uma melhor sensibilidade do sensor de corrente.

A versão final do esquema utilizado no sensor de corrente é apresentada na Figura 10, que mostra a inclusão do amplificador de instrumentação e outro amplificador baseado na utilização de um amplificador operacional TL084 que amplifica o sinal original com um ganho de 2.

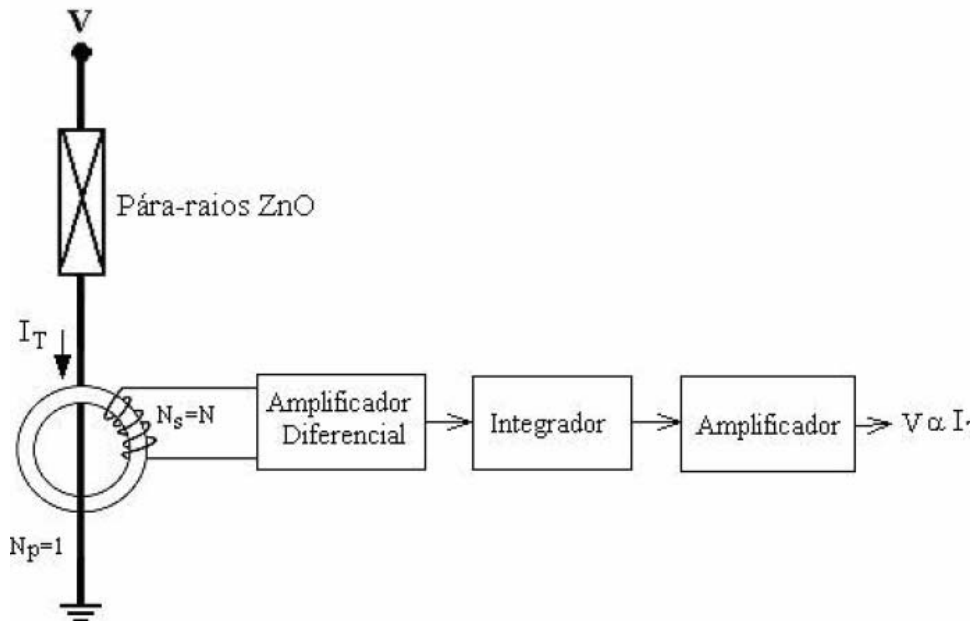


Fig.10 -Diagrama funcional do sensor de corrente de fuga.

Em seguida, na Figura 11 é apresentada a montagem do amplificador de instrumentação, baseado no circuito integrado INA101, seguido de um circuito integrador e o circuito amplificador mencionado anteriormente.

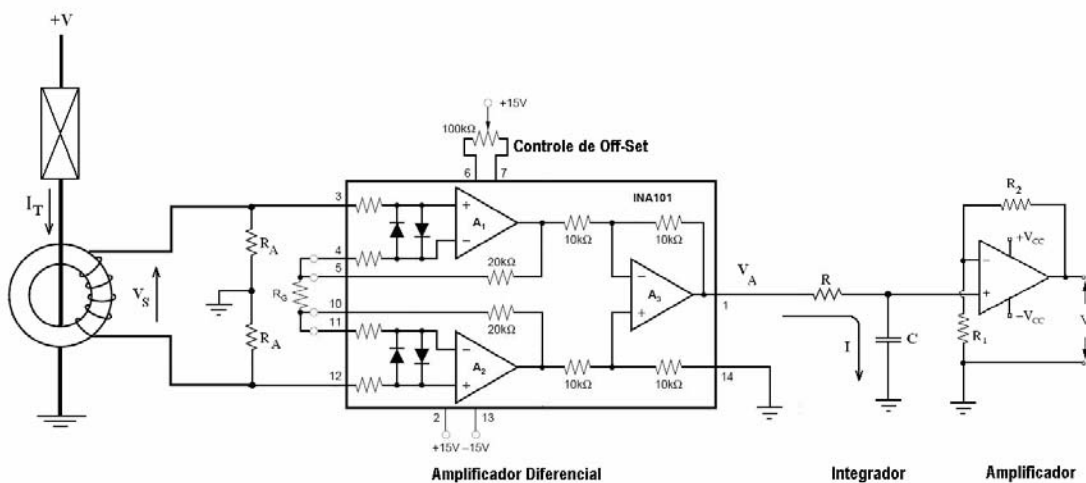


Fig.11 - Esquemático Elétrico do sensor de corrente.

Como pode-se observar, o circuito do sensor de corrente consiste na utilização de um pequeno numero de componentes quando comparado com outros circuitos que desempenham a mesma função.

O circuito integrado INA101 ainda disponibiliza um controle externo da tensão de off-set, esse tipo de controle é bastante útil quando se necessita digitalizar o sinal proveniente de sua saída, pois a referência do nível zero pode ser variada dependendo da necessidade da aplicação.

Como exemplo disso, pode-se citar que o sinal V_A poderia ser o sinal aplicado à entrada de um microcontrolador, porém a maioria dos microcontroladores operam com níveis de tensão positiva entre 0-5 volts e dado a característica senoidal da corrente de fuga dos pára-raios de ZnO, essa exigência não seria atendida. Como solução para esse problema, pode-se variar a tensão de off-set até que o valor médio da corrente seja aproximadamente 2,5 volts.

A etapa seguinte da implementação, baseou-se na construção de um protótipo em placa de circuito impresso, com o auxílio do software Orcad®, o resultado do desenvolvimento é apresentado na Figura 12.

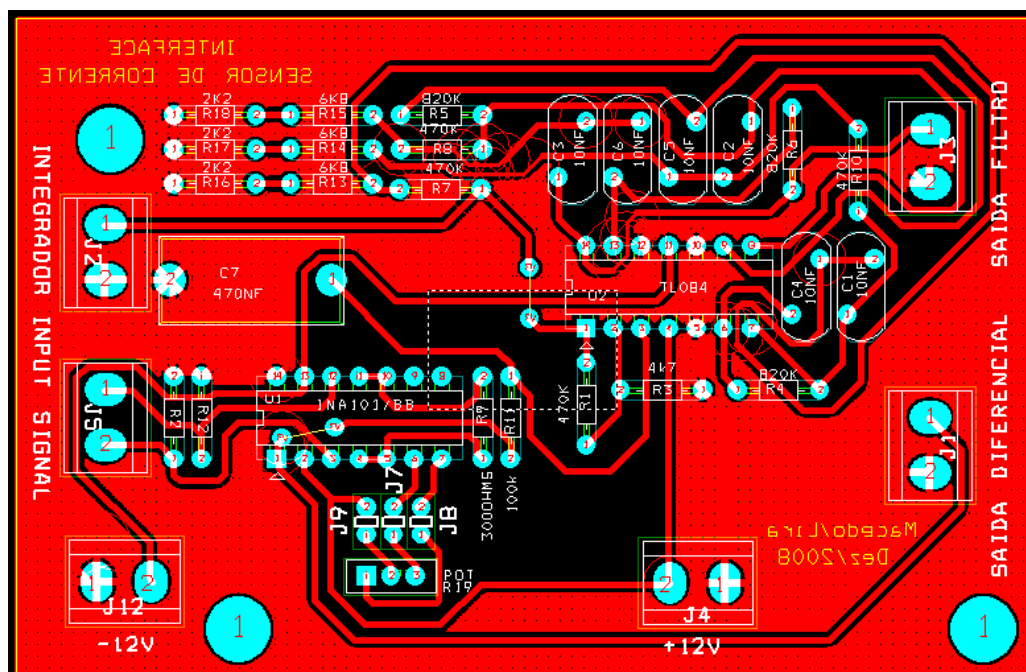


Fig. 12- Projeto da placa de circuito impresso do sensor de corrente proposto

4.1 Resultados

Como resultado final, após a solda dos componentes necessários, tem-se a placa apresentada na Fig. 13, que apresenta as conexões elétricas necessárias para o correto funcionamento do circuito. Pode-se destacar a necessidade de uma fonte de alimentação simétrica de $\pm 12\text{ V}$, as outras conexões elétricas disponíveis são a saída diferencial, a saída do integrador e a saída após um filtro ativo projetado de maneira complementar a necessidade inicial do circuito.

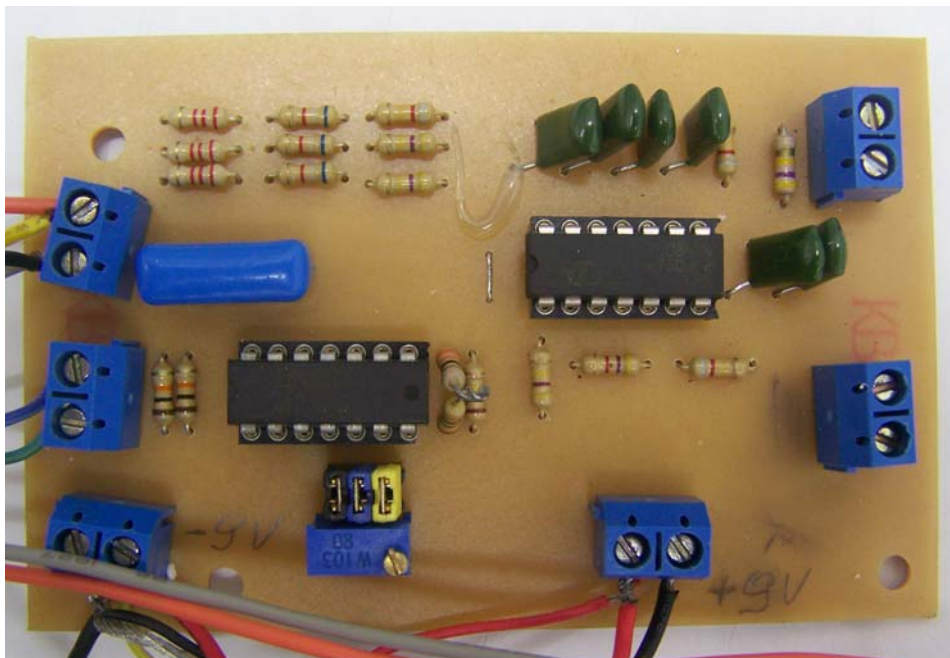


Fig. 13 - Fotografia do sensor de corrente desenvolvido

Optou-se por realizar a medição de uma corrente de forma de onda conhecida de duas maneiras distintas: a primeira consistiu na medição da tensão existente sobre uma resistência conhecida e a segunda corresponde ao sinal obtido a partir da saída do integrador do sensor de corrente proposto, que apresentou em sua saída uma tensão diretamente proporcional a corrente que circula no pára-raios. Apresenta-se a metodologia das medições realizadas na Figura 14.

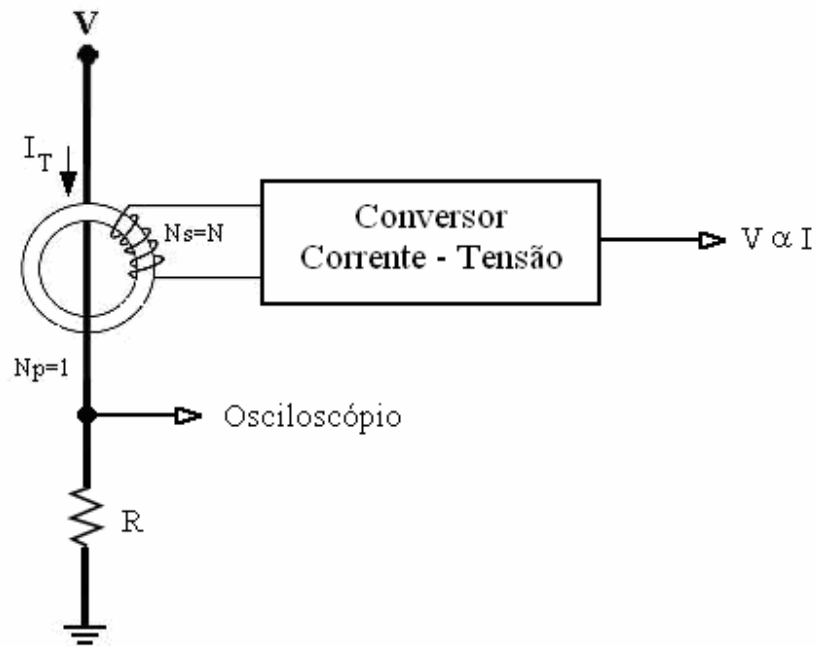


Fig. 14- Esquema utilizado nas medições.

Em seguida com o objetivo de verificar alguns fatores como tempo de resposta, linearidade do sinal obtido, aplicou-se formas de ondas de sinais conhecidos no ponto V da Fig. 14. Os resultados mais significativos foram obtidos, por exemplo, com a aplicação de sinais do tipo triangular e do tipo Sinc(t).

As Figuras 15 e 16 apresentam as telas do osciloscópio utilizado para as medições, a curva superior (azul) foi medida sobre uma resistência de $1k\Omega$ e a curva inferior (vermelha) foi obtida na saída do circuito sensor de corrente.

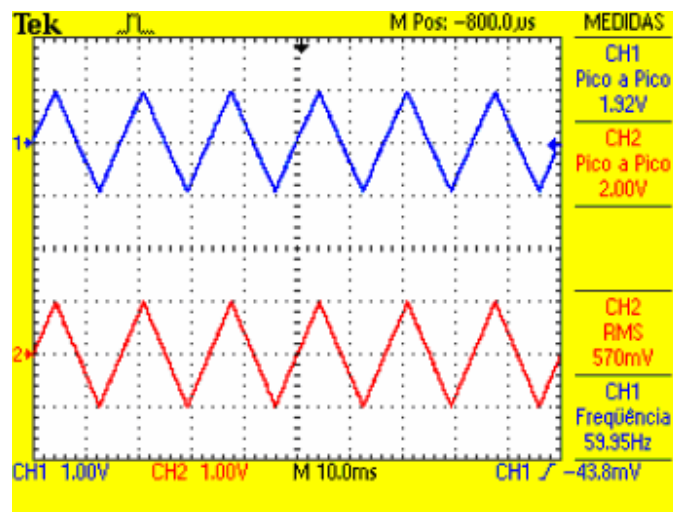


Fig. 15 - Resultado obtido com a aplicação de uma onda triangular.

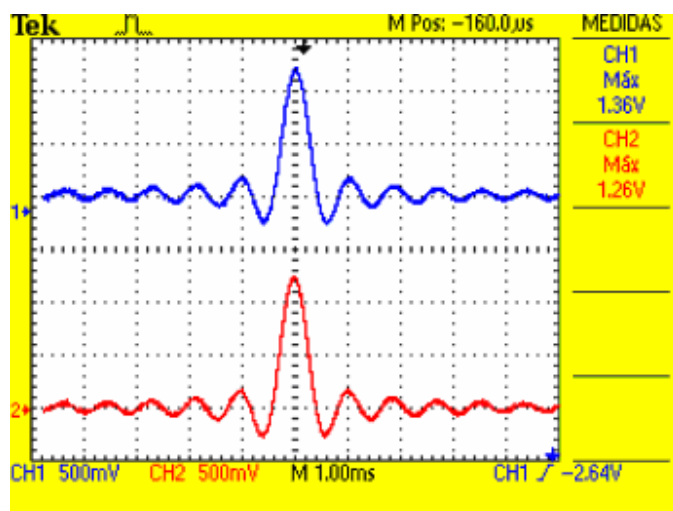


Fig. 16 - Resultado obtido com a aplicação de uma onda do tipo Sinc(t).

Pode-se verificar que os resultados obtidos mostraram-se bastante satisfatórios graças a grande similaridade dos sinais obtidos na saída do circuito sensor de corrente, outra aspecto que deve-se ressaltar é que os sinais aplicados possuíam freqüência de 60 Hz, pois trata-se da freqüência de operação dos pára-raios de ZnO existentes no sistema elétrico brasileiro.

Após a verificação do funcionamento do circuito sensor de corrente, o equipamento foi utilizado em medições da corrente de fuga de pára-raios em operação, ou seja, o sensor foi conectado a um pára-raio utilizado pelo sistema CHESF na subestação de Campina Grande II, a medição foi realizada em um para-raio conectado a uma linha de transmissão de 230 kV, pode-se verificar a forma de onda da corrente a partir das Figuras 17 e 18, outro aspecto importante neste teste, além de verificar o correto funcionamento do sensor de corrente, foi à comprovação de que o circuito do sensor de corrente esta imune aos campos eletromagnéticos existentes na subestação.

Para o isolamento eletromagnético do sensor, instalou-se o circuito em uma caixa metálica, totalmente fechada que permitiu a reflexão das ondas eletromagnéticas incidentes da atmosfera sobre o circuito, também se utilizou nas conexões elétricas existentes apenas cabos com blindagem.

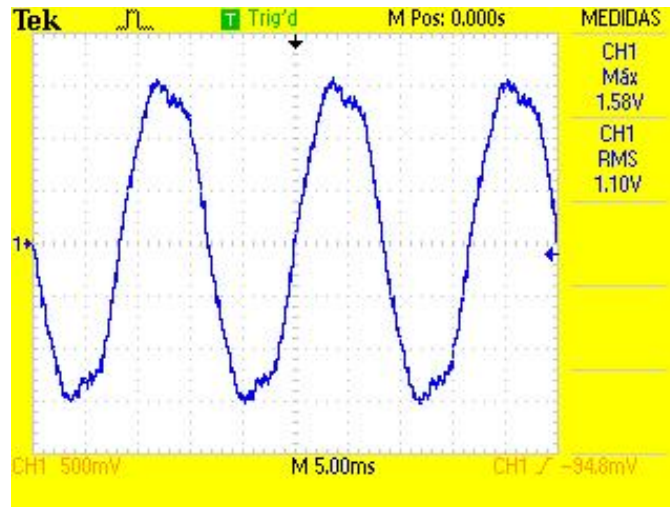


Fig. 17 - Medição da Corrente de Fuga em um para-raio em 230 kV.

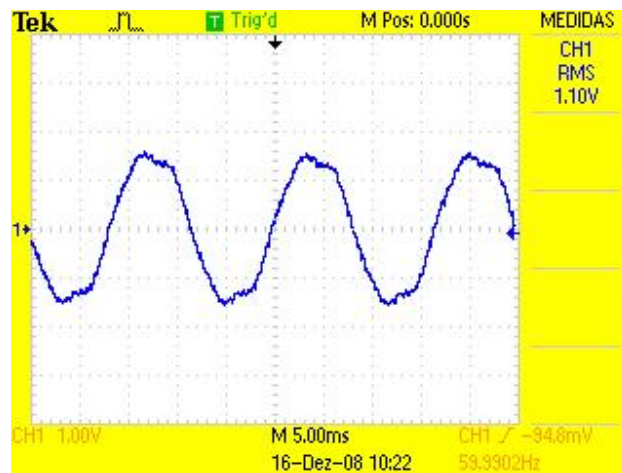


Fig. 18 - Medição da Corrente de Fuga em um para-raio em 230 kV.

Dessa maneira, pode-se verificar que o circuito necessário para a obtenção da corrente de fuga de para-raios de ZnO foi desenvolvido com sucesso. A próxima etapa deste trabalho consistiu no desenvolvimento de um circuito baseado em microcontrolador capaz de realizar a aquisição do sinal proveniente do sensor de corrente e dessa maneira, realizar o processamento necessário para a obtenção da corrente de fuga e de sua componente resistiva, que é como citado anteriormente um dos fatores utilizado no diagnóstico do nível de degradação destes equipamentos.

5 Analisador de espectro

Após o desenvolvimento do sensor de corrente baseado em ligas nanocristalinas, partiu-se para o desenvolvimento de um dispositivo capaz de realizar o processamento dos sinais fornecidos pelo sensor de corrente assim como o sinal de tensão no qual o pára-raios encontra-se submetido, o conhecimento do sinal de tensão é importante para a determinação do defasamento existente entre a tensão e a corrente.

O processamento digital de sinais foi realizado utilizando-se um microcontrolador da linha PIC cujo fabricante é a Microchip®. Para a análise harmônica do sinal da corrente de fuga, utilizou-se a transformada discreta de Fourier, a partir da implementação do algoritmo de Goertzel, que consiste em um filtro digital recursivo RII (resposta ao impulso infinita) com um par de pólos conjugados [5], [9]. Este algoritmo foi utilizado devido à praticidade e a redução do número de operações matemáticas necessárias para a sua realização pelo microcontrolador, [4]. Na seqüência, apresenta-se alguns detalhes existentes no processo de digitalização dos sinais existentes, pois o microcontrolador utilizado possui um conversor analógico-digital interno de 10 bits, permitindo assim uma boa resolução na digitalização dos sinais existentes.

5.1. Digitalização do sinal analógico

De acordo com o Teorema de Nyquist, a quantidade de amostras por unidade de tempo de um sinal, chamada taxa ou frequência de amostragem, deve ser maior que o dobro da maior frequência contida no sinal a ser amostrado, para que possa ser reproduzido integralmente sem erro de sobreposição (*aliasing*). A metade da frequência de amostragem é chamada frequência de Nyquist e corresponde ao limite máximo de frequência do sinal que pode ser reproduzido.

Como o sinal analógico tem banda limitada e é contínuo no tempo e em nível, contendo uma infinidade de valores, devemos armazenar apenas certa quantidade de amostras deste sinal, como enunciado anteriormente no Teorema de Nyquist. Considerando que a frequência do sinal aplicado é de 60 Hz e devemos ter a possibilidade

de calcular até a 16^a harmônica, a frequência do sinal de amostragem neste caso deve ser de $2Nf$, ou seja, $2 \times 16 \times 60 = 1920$ Hz, o que equivale a uma taxa de amostragem de 32 pontos em um período de 1/60 segundos. As amostras são obtidas com um intervalo de tempo entre elas de 1/1920 segundos, resultando um intervalo de aproximadamente 520 μ s.

Após o sinal analógico ser digitalizado, em forma de amostras ainda analógicas, precisamos quantificar (ou quantizar) esta infinidade de valores possíveis em outros que passam ser representados por uma quantidade finita de bits, para obter um sinal digital.

5.2. Descrição Funcional

Como citado anteriormente, existe a necessidade inicialmente de obtermos dois sinais: a tensão aplicada ao pára-raios e a corrente de fuga que circula pelo o mesmo, dessa maneira, o sistema é composto de dois canais analógicos de entrada independentes V1 e V2 possibilitando a análise harmônica simultânea de dois sinais.

Os sinais analógicos da entrada, ou seja, as amostras de tensão e corrente a serem analisadas são aplicados inicialmente a um módulo condicionador de sinais que os torna adequados para o processo de digitalização que se segue.

Para a correta digitalização do sinal é necessário que o sistema esteja estabilizado e apenas após a estabilização é apresentada no display LCD a mensagem que o equipamento esta pronto para começar a digitalizar o sinal.

A representação esquemática do circuito utilizado para realizar a aquisição dos dados, ou seja, V1 e V2 é apresentado a seguir na Figura 19:

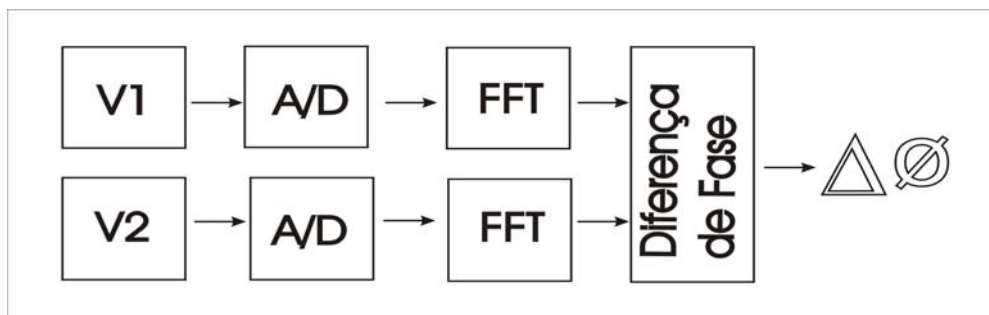


Fig. 19 - Representação esquemática do procedimento realizado pelo sistema de aquisição de dados.

Após a passagem dos dois sinais V1 e V2 pelo o conversor analógico digital, realizou-se a transformada rápida de Fourier (FFT) para a obtenção dos fasores da tensão aplicada e da corrente de fuga, obtendo-se assim a diferença de fase existente entre os dois sinais.

5.3. Processamento da informação adquirida

Na seqüência da etapa de digitalização, o sinal de corrente proveniente do pára-raios de ZnO, encontra-se disponível para o processamento da informação. Esse processamento pode consistir em operações como a separação da componente resistiva da corrente, ou ainda a análise harmônica deste sinal dentre outras operações interessantes no diagnostico deste dispositivo de proteção de sistemas elétricos.

5.4. Análise harmônica do sinal

Para a análise harmônica dos sinais, foi escolhido o algoritmo de Goertzel que é um procedimento muito eficiente para se calcular o conteúdo harmônico de uma seqüência periódica. Dessa maneira, apresenta-se com mais detalhes uma ferramenta capaz de realizar a Transformada de Fourier Discreta (DFT).

Feita a implementação deste algoritmo no microcontrolador PIC, o sistema foi testado com vários sinais cujos resultados eram previamente conhecidos para validação do sistema proposto.

5.5. O Algoritmo de Goertzel

O algoritmo de Goertzel é um procedimento computacional para análise harmônica que é mais eficiente que o método direto. Esse método é um exemplo de como a periodicidade de W_N pode ser utilizada para reduzir o número de operações aritméticas.

Este algoritmo é mais eficiente do que a Transformada Rápida de Fourier [FFT] quando se requer a computação de apenas algumas harmônicas em vez de todas como no caso em estudo.

Para se construir o algoritmo de Goertzel, note-se inicialmente que

$$W_N^{-kN} = e^{j2\pi kN/N} = e^{j2\pi k} = 1 \quad (9)$$

Multiplicando ambos os lados da equação (9) por

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{kn}; \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (10)$$

Obtém-se:

$$X(k) = W_N^{-kN} \sum_{r=0}^{N-1} x(r)W_N^{kr} = \sum_{r=0}^{N-1} x(r)W_N^{-k(N-r)} \quad (11)$$

Por conveniência, define-se a seqüência;

$$y_k(n) = \sum_{r=0}^{N-1} x(r)W_N^{-k(N-r)} \quad (12)$$

Das equações (11) e (12) segue-se que

$$X(k) = y_k(n) \Big|_{n=N} \quad (13)$$

A equação (12) é claramente uma convolução discreta da seqüência finita $x(n)$, $0 \leq n \leq N-1$, com a seqüência W_N^{-kn} . Assim, $Y_k(n)$ pode ser visto como a resposta do sistema, com resposta impulsional W_N^{-kn} , a uma entrada $x(n)$.

Em particular, $X(k)$ é o valor da saída quando $n = N$. O diagrama de fluxo de um sistema com tal resposta impulsional é mostrado na Figura 20 a seguir.

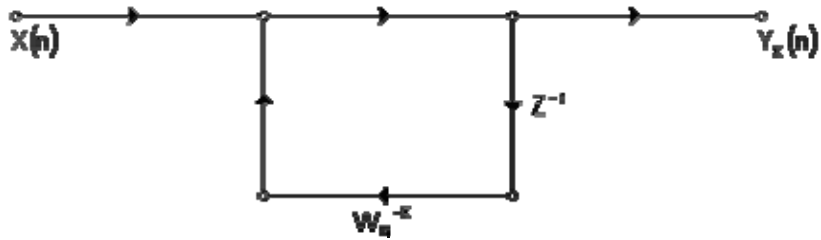


Fig. 20 - Diagrama de fluxo de um sistema com resposta impulsional.

Como a entrada e a resposta impulsional são sinais complexos, o cálculo de cada novo valor de $Y_k(n)$ requer quatro multiplicações reais e quatro adições reais. Como existem N valores de $Y_k(n)$ a serem calculados, o esquema representado na Figura 20 requer $4N$ multiplicações reais e $4N$ adições reais para o cálculo de $X(k)$ para um determinado valor de k . Assim, este esquema é menos eficiente do que o método direto. No entanto, o método mostrado na Figura 20 não necessita realizar o cálculo nem tampouco o armazenamento dos coeficientes W_N^{kn} , pois estes são calculados pelo processo recursivo.

No entanto, é possível manter esta simplificação enquanto o número de multiplicações é reduzido por um fator 2. Para isso, note-se que a função de transferência do sistema da Figura 20 é dada por:

$$H_k(z) = \frac{1}{1 - W_N^{-k} z^{-1}} \quad (14)$$

Multiplicando o numerador e o denominador da função de transferência acima pelo fator $(1 - W_N^k z^{-1})$, obtém-se:

$$H_k(z) = \frac{1 - W_N^{-k} z^{-1}}{(1 - W_N^{-k} z^{-1})(1 - W_N^k z^{-1})} = \frac{1 - W_N^{-k} z^{-1}}{1 - 2\cos\left(\frac{2\pi}{N}k\right)z^{-1} + z^{-2}} \quad (15)$$

O diagrama de fluxo correspondente à função de transferência dada acima se encontra ilustrada na Figura 21.

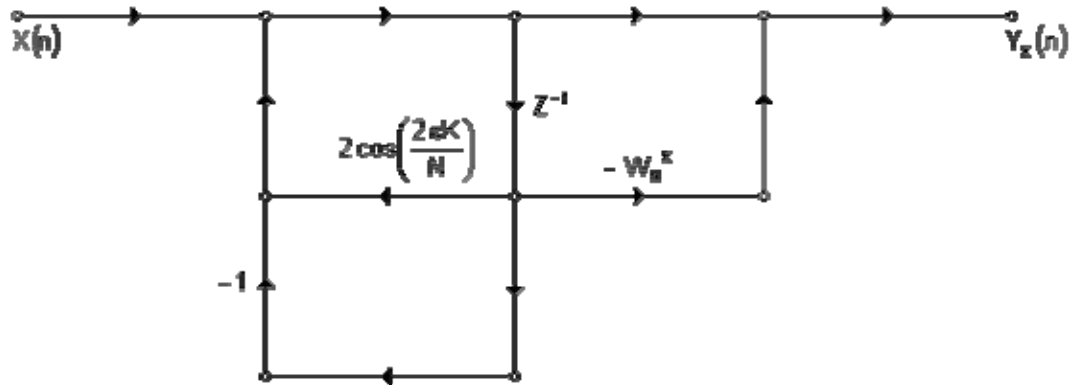


Fig. 21 - Diagrama de fluxo de um sistema com resposta impulsional implementada.

A equação do filtro digital implementada, mostrada no diagrama da Figura 21, é expressa nas equações a seguir:

$$s_k[n] = x[n] + 2 \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) s_k[n-1] - s_k[n-2] \quad (16)$$

$$y_k[n] = s_k[n] - W_N^k s_k[n-1] \quad (17)$$

$$s_k[-2] = s_k[-1] = 0 \quad (18)$$

Com estas equações é possível calcular tanto a parte real como a parte imaginária da Transformada Discreta de Fourier. Somente duas multiplicações e quatro adições são necessárias para o cálculo dos pólos do sistema. Como se deseja calcular $y_k[N]$, a multiplicação complexa pelo coeficiente $-W_N^k$ necessária para o cálculo do zero apenas é necessário ser realizada após a N -ésima iteração.

Tem-se então um total de $2N$ multiplicações reais e $4N$ adições reais para os pólos e quatro multiplicações e adições reais para o zero, totalizando $2(N+2)$ multiplicações reais e $4(N+1)$ adições reais, ou seja, aproximadamente metade das multiplicações necessárias no método direto.

Tanto no método direto quanto no método de Goertzel, não é necessário avaliar todos os N valores de $X(k)$. Pode-se em geral avaliar $X(k)$ para quaisquer M valores de k . Nesse caso o número de operações é proporcional a $N \cdot M$, o que torna esse esquema interessante para um pequeno valor de M .

5.6. Hardware desenvolvido

Devido à necessidade de se realizar a aquisição de sinais de corrente e tensão provenientes dos pára-raios, desenvolveu-se um sistema de aquisição de dados baseado em um sistema microcontrolado composto pelos seguintes dispositivos eletrônicos: microcontrolador, mostrador de cristal líquido (display LCD), memória externa, relógio digital, relé para acionamento de cargas.

Com o intuito de se realizar a comunicação sem fio entre o sistema de medição e por exemplo, a sala de controle de uma subestação implementou-se uma fonte de alimentação de 3,3 V, uma vez que essa é a tensão de operação da maioria dos sistemas de comunicação sem fio. Dessa maneira, além de fornecer os 5,0 V habituais para a alimentação do microcontrolador PIC e do LCD, na placa desenvolvida existe a possibilidade de se fornecer a tensão de 3,3V. Para tal, foi utilizado um dispositivo eletrônico denominado de regulador de tensão (LM317) que possibilita obter uma tensão de aproximadamente 3,3V a partir de uma alimentação de 5,0 V proveniente de outro regulador de tensão (TL7805).

O diagrama elétrico das fontes de alimentação projetadas é mostrado na Figura 22.

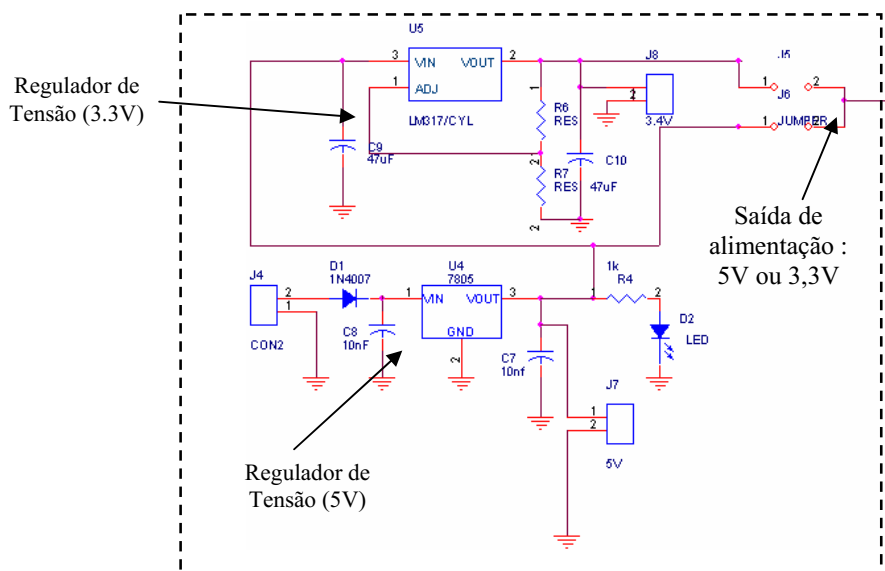


Fig. 22 – Diagrama elétrico das fontes de tensão desenvolvidas.

No circuito da Fig. 22, pode-se observar a existência das chaves J5 e J6 que permitem a mudança do nível de tensão de operação da placa entre 5,0 V e 3,3 V, possibilitando, portanto, uma maior flexibilidade na placa de desenvolvimento.

Após a obtenção dos níveis de tensão apropriados para o desenvolvimento da aplicação, partiu-se para do sistema de aquisição de dados.

5.6.1. Desenvolvimento da placa de aquisição de dados dedicada ao microcontrolador PIC.

Com a finalidade de se obter um protótipo de baixo custo, maior flexibilidade de comunicação, optou-se pelo desenvolvimento modular do protótipo, ou seja, foi realizado o desenvolvimento de duas placas, as quais podem ser interconectadas, dependendo da conveniência. Uma delas é denominada placa primária e a outra secundária.

Na placa primária, está o microcontrolador PIC, assim como as fontes de tensão e os dispositivos como memória externa e relógio digital. Tal implementação é apresentada na Figura 23.

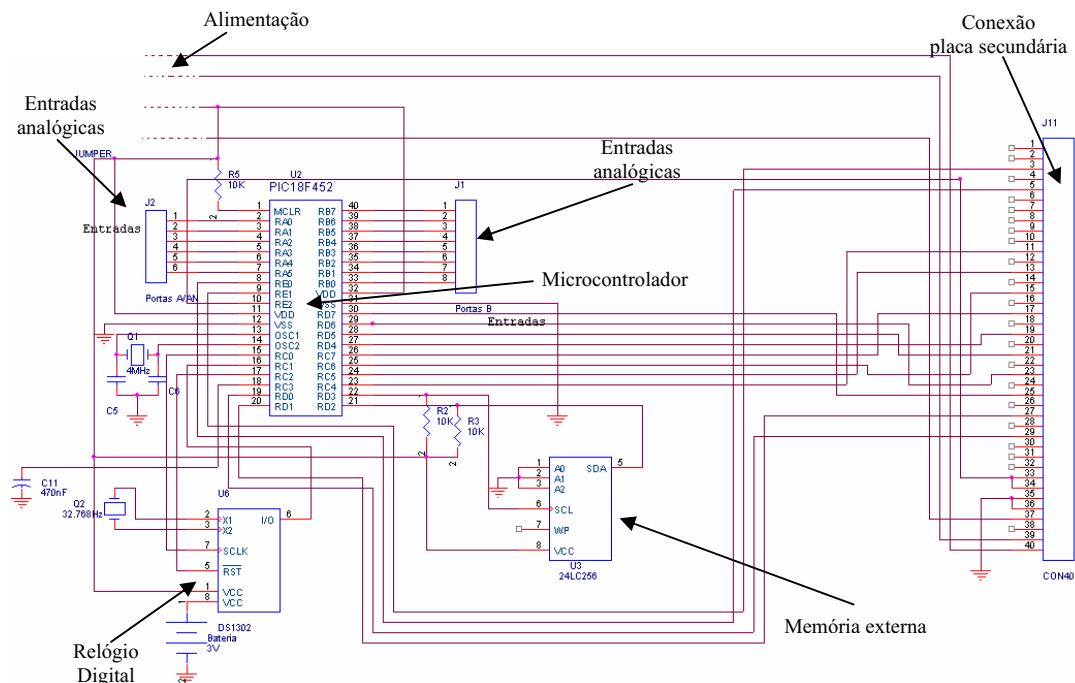


Fig. 23 - Diagrama elétrico da “placa primária”.

Essa placa possui como dispositivo principal o microcontrolador, o qual permite a utilização de algumas portas como entradas digitais e analógicas. Tem-se, também, uma

memória externa que permite a gravação de informações, outro dispositivo de interesse é o relógio digital DS1302 o qual permite a gravação temporal exata dos instantes de tempo nos quais uma determinada operação foi realizada pelo o PIC. Existe ainda um conector que possibilita a interligação da placa secundária à primária, permitindo assim, o desenvolvimento de placas com dimensões reduzidas.

5.6.2. Implementação da placa secundária do sistema de aquisição de dados

Caso seja necessária a apresentação dos resultados obtidos pelo o PIC em algum tipo de periférico do tipo LCD ou até mesmo em um microcomputador utilizando comunicações do tipo RS-232 ou USB, é necessária apenas a interconexão da placa secundária com a primária.

Esta simples conexão acrescenta um enorme poder de comunicação entre o usuário, pois possibilita a utilização de um display LCD 16x2, além de conexões USB e serial, e o acionamento de pequenas cargas, tais como dispositivos de sinalização ou sirenes, através de relés.

O diagrama elétrico da placa secundária é apresentado com o auxílio da Figura 24.

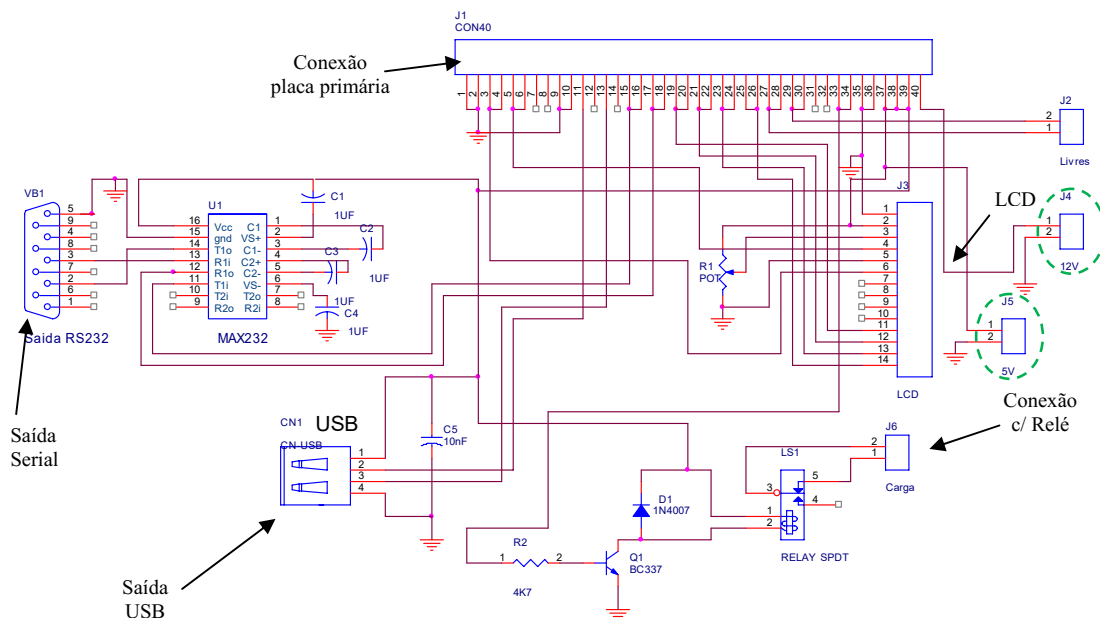


Fig. 24 - Placa de desenvolvimento secundária.

Pode-se observar a existência de alguns conectores que fornecem tensões fixas de 5,0 V e 12,0 V, os quais são destacados na Figura 24.

5.6.3 Criação do layout da placa primária.

Baseado no diagrama elétrico mostrado na Figura 23 elaborou-se o layout da placa primária utilizando-se o software Orcad®. Na Figura 25 é apresentado o layout da placa de circuito impresso.

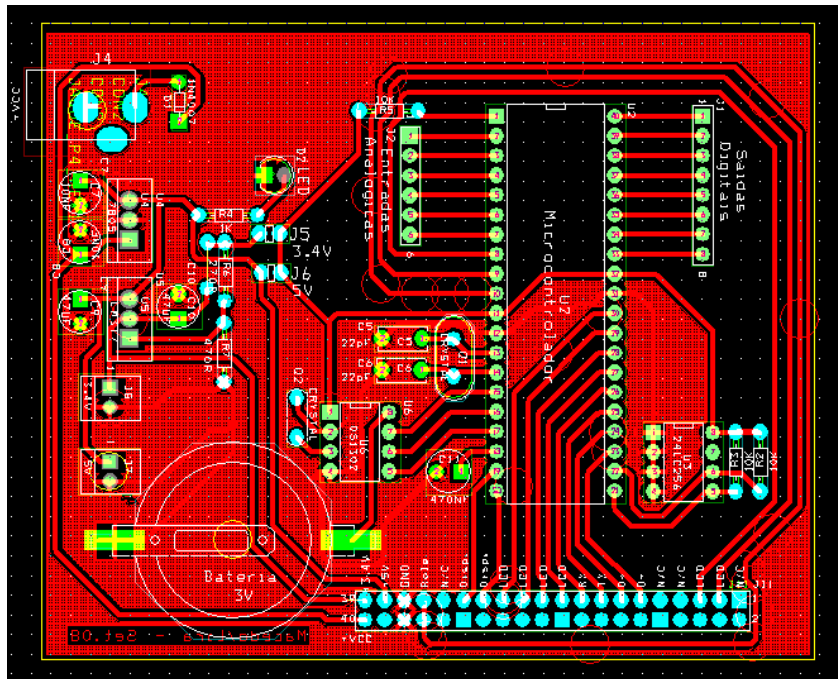


Fig. 25 - Layout desenvolvido para a placa primária.

5.6.4. Criação do layout da placa secundária.

Na Figura 26 é apresentado o layout do circuito da placa secundária abordada anteriormente.

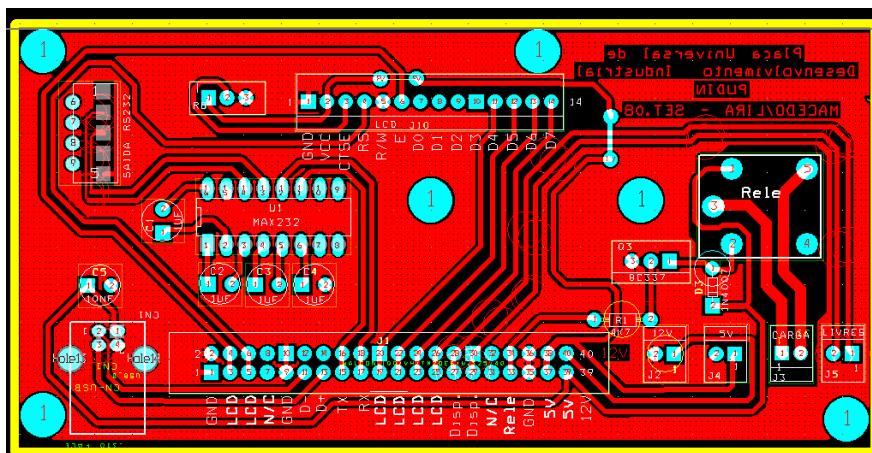


Fig. 26- Layout desenvolvido para a placa secundária.

Na seqüência, tem-se a apresentação da montagem física dos dispositivos eletrônicos na placa de circuito impresso desenvolvida, ou seja, a solda dos componentes eletrônicos necessários para o correto funcionamento do circuito.

Dessa maneira utilizando a placa desenvolvida nesta etapa, pode-se conectar o microcontrolador ao circuito condicionador de sinais desenvolvido em etapas anteriores e assim realizar a aquisição de sinais senoidais no microcontrolador PIC 18F452.

O funcionamento do circuito para a aquisição de sinais pode ser esquematizado com o auxílio da Figura 27.

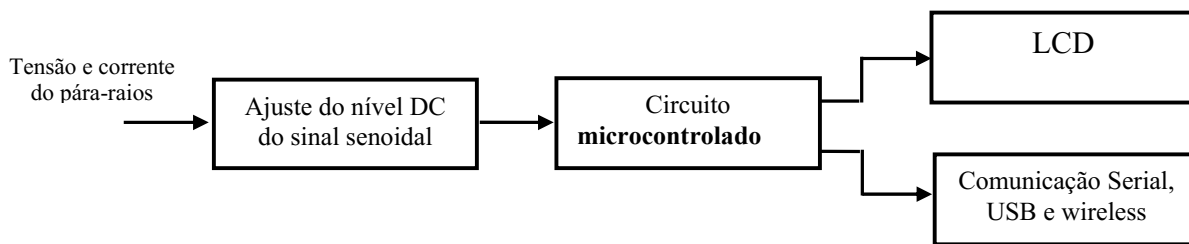


Fig. 27 – Diagrama de blocos do circuito desenvolvido.

Como resultado deste desenvolvimento, tem-se a fotografia do circuito implementado apresentada na Figura 28.

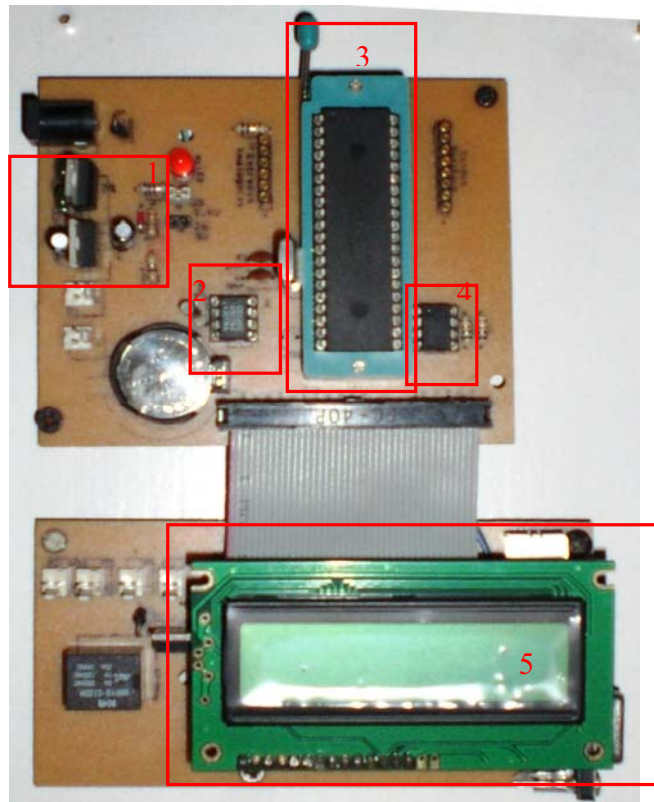


Fig. 28 - Fotografia do circuito implementado.

Pode-se resumir os principais componentes do circuito implementado pelos os números destacados na Figura acima.

- 1 – Reguladores de tensão das fontes de alimentação de 5 V e 3.3 V;
- 2 – Relógio Digital;
- 3 – Microcontrolador PIC 18F452;
- 4 – Memória externa;
- 5 – Display LCD.

5.6.5. Placa de aquisição de dados dedicada ao microcontrolador PIC.

Em seguida apresentam-se mais detalhadamente os circuitos desenvolvidos a partir de algumas fotografias, inicialmente tem-se a placa primária, que é a responsável pela aquisição assim como pelo o processamento dos sinais adquiridos a partir dos pára-raios.

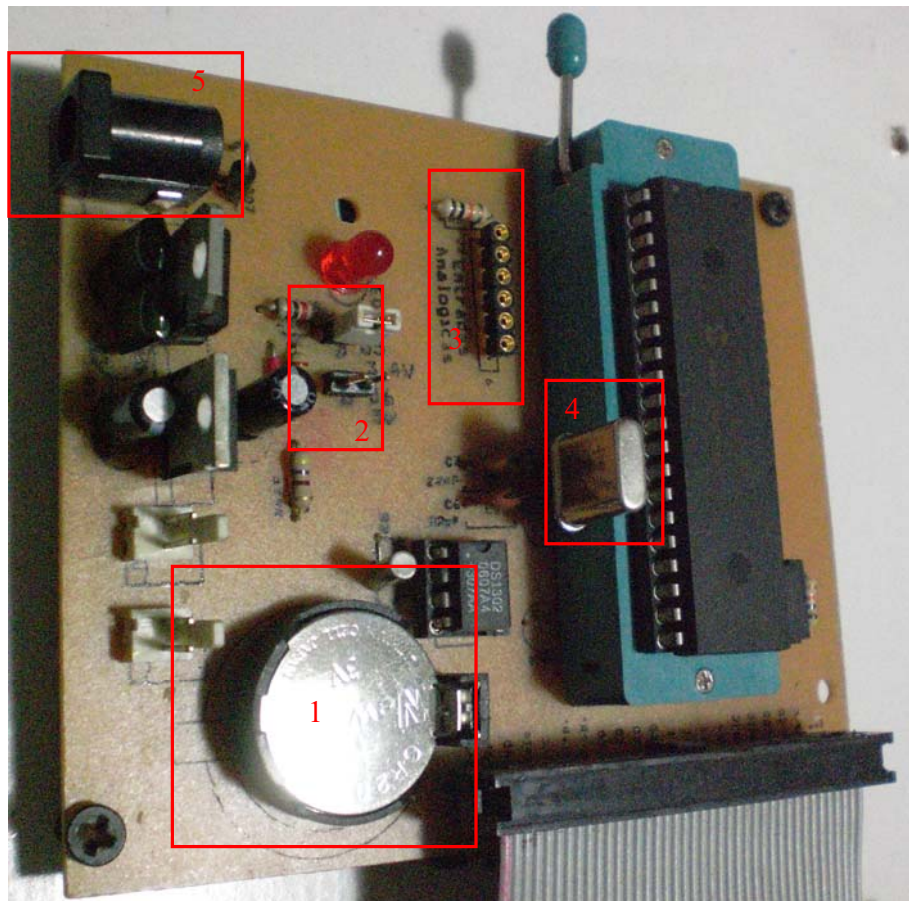


Fig. 29 – Fotografia destacando a construção da placa primária

Pode-se destacar nesta fotografia:

- 1 – Bateria de alimentação para o relógio digital DS1302;
- 2 – Chaves seletoras do nível de tensão de operação da placa: 3.3 V ou 5 volts;
- 3 – Soquete de acesso às entradas analógicas ou digitais do microcontrolador;
- 4 – Cristal para o oscilador interno no PIC;
- 5 – Entrada para tensão de alimentação de 9 volts.

5.6.6. Placa secundária do sistema de aquisição de dados

De forma semelhante, pode-se apresentar com mais detalhes a placa secundária, desenvolvida para a apresentação dos resultados obtidos a partir do microcontrolador, assim como, a comunicação entre o equipamento desenvolvido e outros tipos de equipamentos eletro-eletrônicos como, por exemplo, um microcomputador através das comunicações serial e USB.

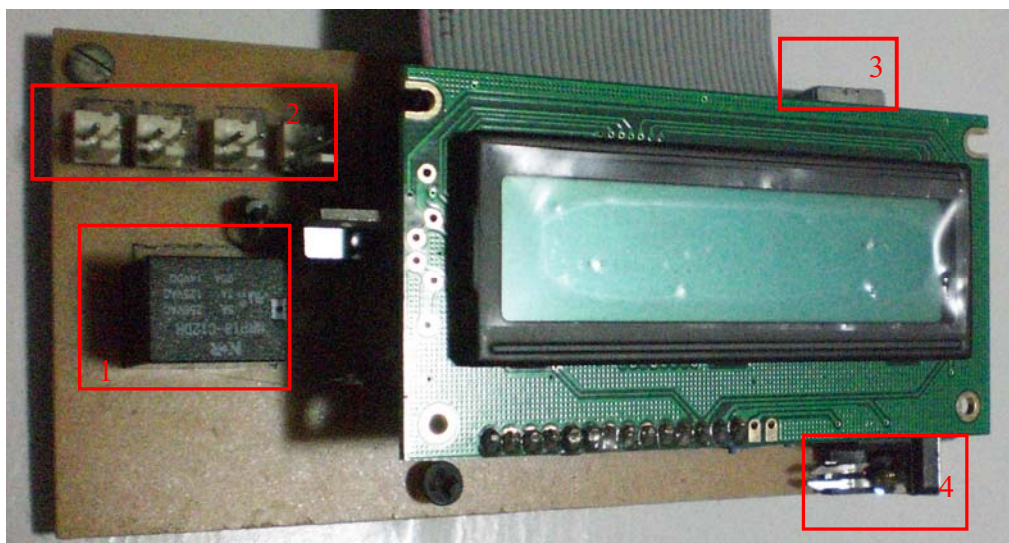


Fig. 30 – Fotografia da placa secundária para apresentação dos resultados

De forma análoga as outras figuras apresentadas têm-se:

- 1 – Relé para o acionamento de cargas;
- 2 – Conectores para conexões com dispositivos externos;
- 3 – Conexão USB;
- 4 – Saída serial.

5.6.7. Testes realizados

Com o objetivo de investigar o desempenho do sistema de medição proposto, foram realizados testes experimentais que consistiram principalmente da verificação do funcionamento de cada componente eletrônico utilizado nas placas, baseados na medição dos níveis de tensão existentes em cada componente eletrônico.

Também, algumas rotinas de aquisição de sinais foram programadas no microcontrolador PIC para a verificação do funcionamento da aquisição e processamento de sinais a partir do conversor A/D interno do microcontrolador. Adicionalmente diversos ensaios experimentais, consistindo na aquisição sistemática de sinais de espectro previamente conhecidos para efeito comparativo foram realizados.

Sinais analógicos com formas de onda senoidais, quadráticas e triangulares de diversas frequências e amplitudes foram utilizados em ensaios desenvolvidos em bancada de laboratório, como objetivo de comparar os valores calculados de seus espectros com os valores teóricos esperados. Na Figura 31 é mostrado o arranjo experimental utilizado.

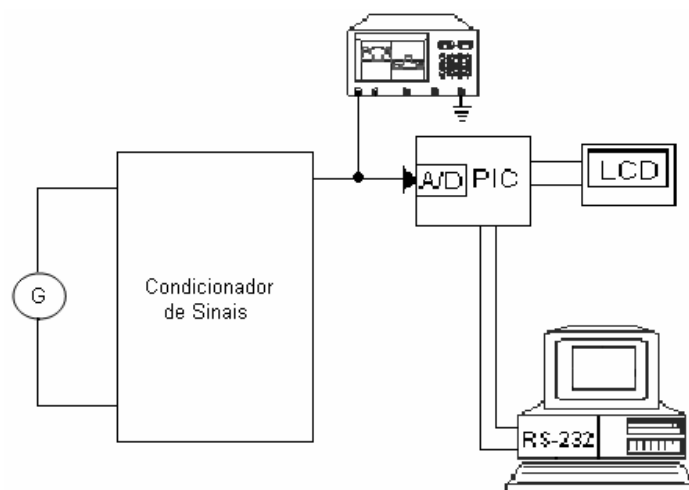


Fig. 31 - Arranjo experimental utilizado para análise espectral de sinais.

Como exemplos, serão apresentados os resultados dos ensaios utilizando-se as ondas quadrada e triangular. A análise harmônica foi realizada a partir da programação do algoritmo de Goertzel no microcontrolador. Para a sua validação, foram aplicados diversos sinais e os resultados obtidos foram comparados com resultados obtidos de simulações utilizando-se uma rotina desenvolvida no ambiente Matlab®.

Os resultados obtidos do ensaio com sinal de onda quadrada podem ser comparados na Figura 33. O sinal no qual foi realizada a DFT, é apresentado na Figura 32. Este sinal foi obtido a partir da reconstrução do sinal utilizando o ambiente Matlab® e os pontos recebidos pela porta de comunicação RS232 do microcontrolador.

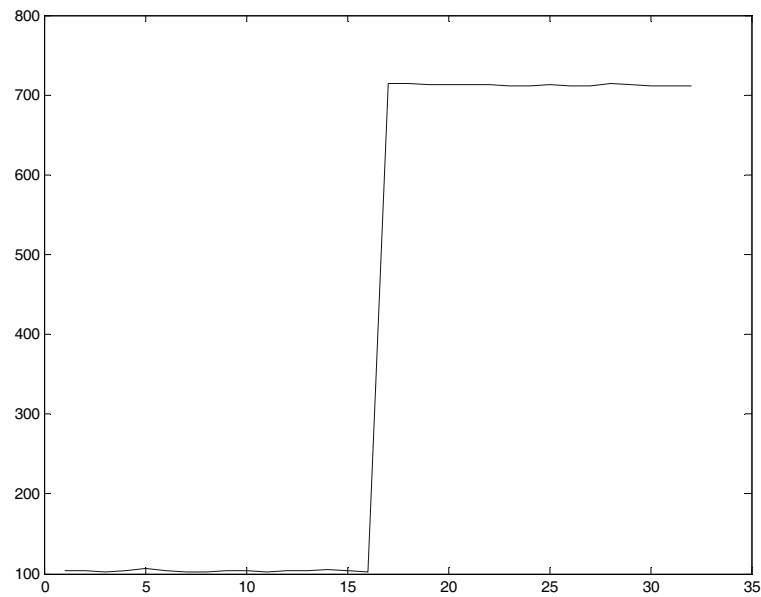


Fig. 32 - Onda quadrada digitalizada pelo microcontrolador – 1 ciclo.

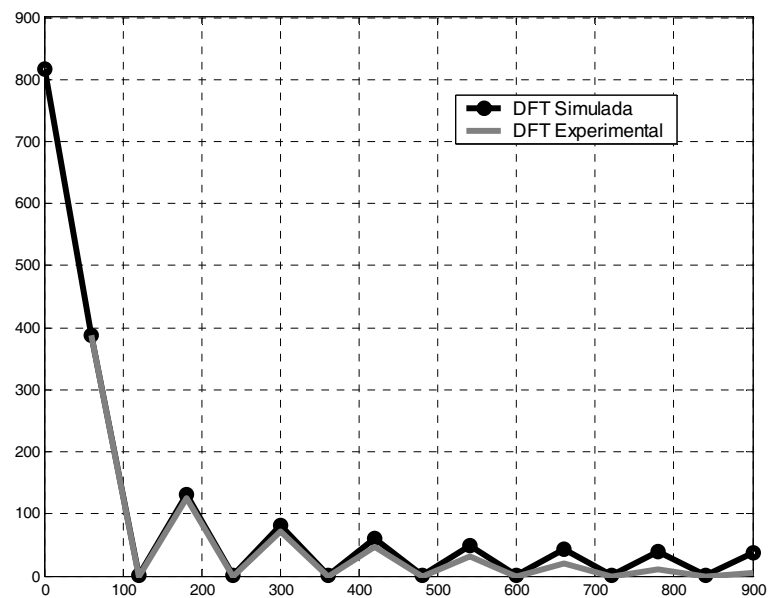


Fig.33 - Comparativo das DFT simulada no Matlab® e a DFT experimental.

Os resultados obtidos do ensaio com onda triangular podem ser comparados na Figura 35. O sinal no qual foi realizada a DFT, é apresentado na Figura 34. Este sinal foi obtido a partir da reconstrução do sinal utilizando o ambiente Matlab® e os pontos recebidos pela porta de comunicação RS232 do microcontrolador.

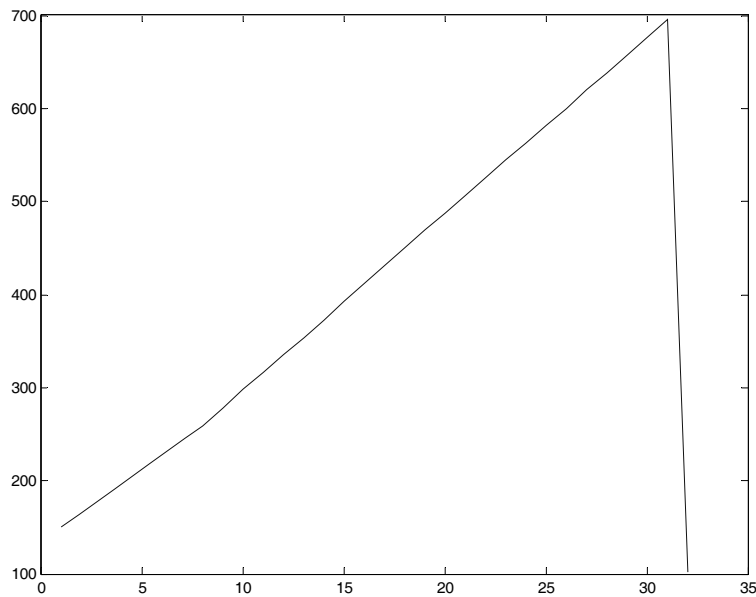


Fig. 34 - Onda triangular digitalizada pelo microcontrolador – 1 ciclo.

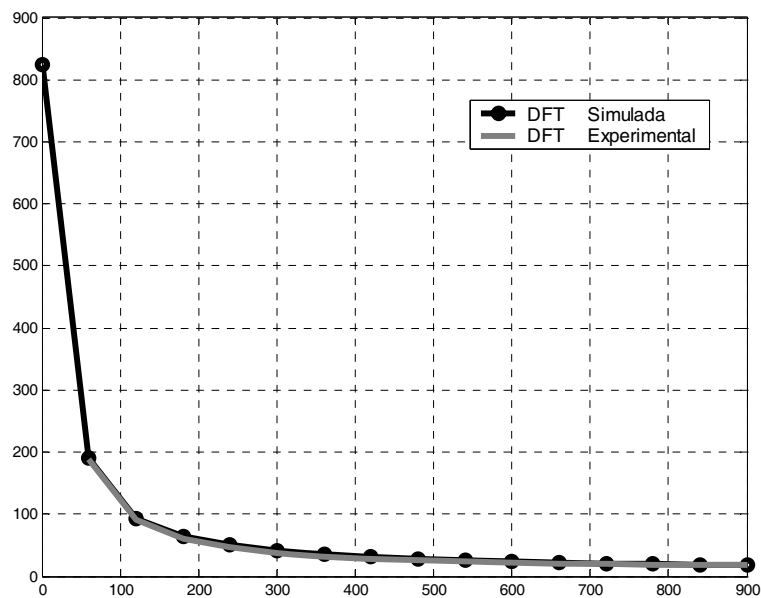


Fig. 35 - Comparativo das DFT simulada no Matlab® e a DFT experimental.

Em todos os casos os testes realizados apresentaram resultados numéricos compatíveis com os valores teóricos esperados.

Posteriormente, foram aplicados sinais senoidais na entrada analógica do microcontrolador. Os sinais apresentavam diferenças de fases previamente conhecidas. Para validação da medição digital de fase, foi utilizado o circuito defasador apresentado na Figura 36, no qual os valores de R e C proporcionaram as diferenças de fase.

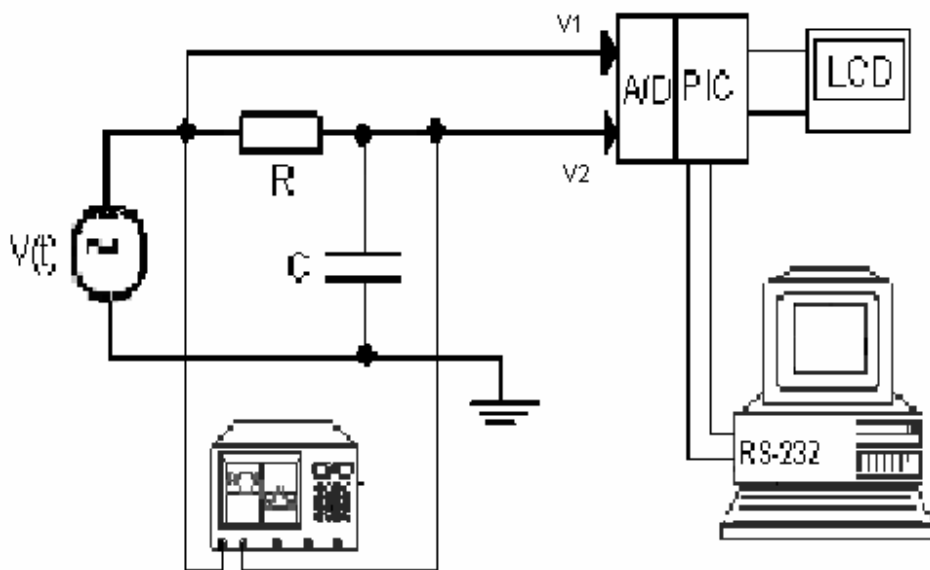


Fig. 36- Arranjo experimental utilizado para medição digital de fase.

Os valores dos defasamentos foram calculados analiticamente adotando-se $R=12\text{ K}\Omega$ sendo seu valor medido de $11,88\text{ K}\Omega$ e variando os valores de C. Os valores utilizados para C foram medidos em laboratório e não seus valores nominais. Nas mesmas condições, medições foram realizadas utilizando o conversor analógico digital interno do microcontrolador PIC 18F452 e em seguida os resultados obtidos foram transferidos para um computador pessoal para um posterior tratamento.

Na Tabela 1 são mostrados os valores de C, os valores do defasamento calculados e obtidos na medição realizada pelo microcontrolador e os respectivos erros.

TABELA 1
Medição de defasamento realizado pela metodologia proposta

C	Defasamento Calculado	Defasamento medido	Erro Calculado (%)
0,2121 μF	43,52°	42,70°	1,88
0,3538 μF	57,74°	55,29°	4,24
0,561 μF	68,29°	65,66°	3,85

Nas Figuras 37, 38 e 39 apresentam-se as telas do osciloscópio capturadas, nas quais são mostradas as formas de ondas e os respectivos defasamentos. Na Tabela 2 são mostrados os valores de C, os valores do defasamento calculados e obtidos na medição realizada pelo osciloscópio e os respectivos erros.

TABELA 2
Medição de defasamento realizado pela metodologia proposta

C	Defasamento calculado	Defasamento medido	Erro Calculado (%)
0,2121 μF	43,52°	43,20°	0,73
0,3538 μF	57,74°	55,29°	4,24
0,561 μF	68,29°	65,66°	3,85

Como podem ser observados, os resultados obtidos utilizando a metodologia proposta apresentaram resultados numéricos compatíveis com os valores teóricos esperados.

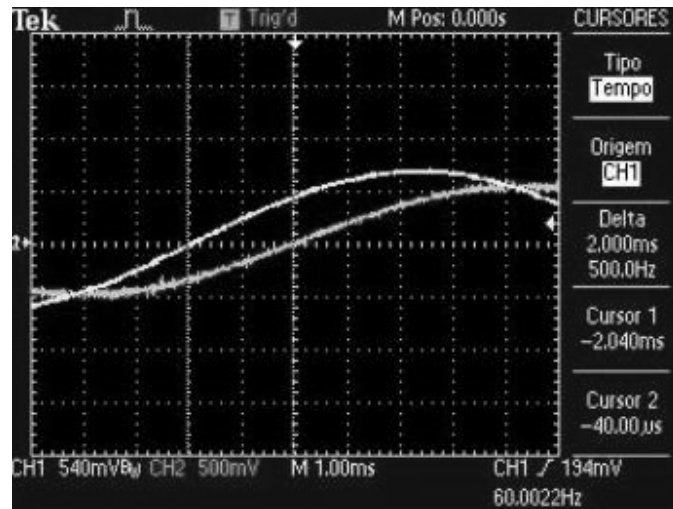


Fig.37 - Medição de defasamento utilizando $C = 0.22\mu\text{F}$.

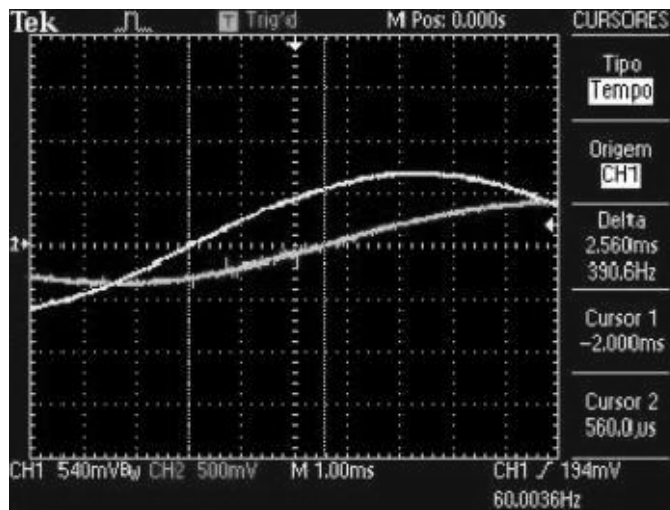


Fig. 38 - Medição de defasamento utilizando $C = 0.33\mu\text{F}$.

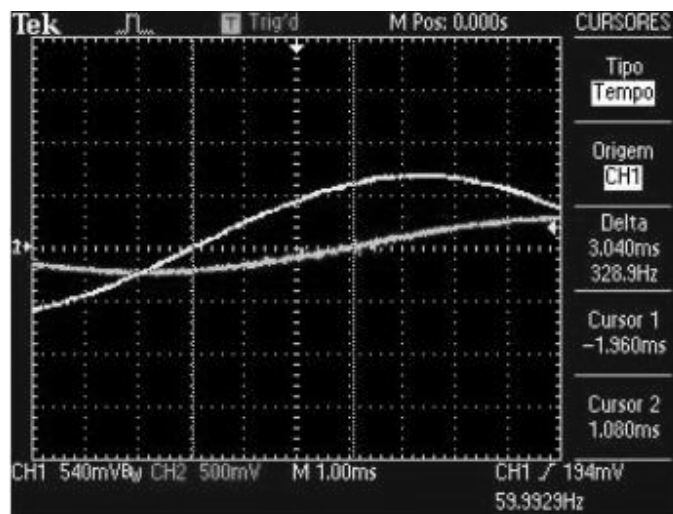


Fig. 39 - Medição de defasamento utilizando $C = 0.55\mu\text{F}$.

6 Considerações Finais

Este relatório teve como objetivo principal apresentar uma parte dos trabalhos realizados nos laboratórios de Alta Tensão – LAT e no de Instrumentação e Metrologia Científica – LIMC, ambos pertencentes à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica para o desenvolvimento de um medidor de corrente de fuga baseado em microcontrolador aplicado principalmente a pára-raios de Oxido de Zinco ZnO.

O trabalho teve como objetivo apresentar um equipamento de relativo baixo custo capaz de diagnosticar os pára-raios de Oxido de Zinco, que são equipamentos indispensáveis ao sistema elétrico de potência.

Após um estudo detalhado na bibliografia especializada sobre os pára-raios de Oxido de Zinco, verificou-se a necessidade do desenvolvimento de um sistema capaz de realizar a medição, processamento e análise harmônica da corrente de fuga que circula nestes equipamentos.

Por ser uma aplicação destinada ao sistema elétrico de potencia, foi necessário realizar o condicionamento dos níveis de sinais provenientes dos pára-raios, com esse propósito, foi projetado e construído um circuito capaz de adequar os níveis dos sinais para patamares adequados aos requerimentos do medidor de corrente desenvolvido.

Na continuidade do projeto, o projeto de um sensor de corrente baseado em ligas nanocristalinas, que se destaca por ser um material de alta permeabilidade magnética. Dessa maneira, um protótipo foi desenvolvido em laboratório e testado na subestação distribuição de Campina Grande II do sistema CHESF, obtendo bons resultados.

Após o desenvolvimento de um circuito capaz de fornecer o sinal da corrente de fuga que circula no pára-raios, desenvolveu-se um circuito baseado em microcontrolador PIC® capaz de realizar a digitalização tanto do sinal de corrente, como do sinal da tensão aplicado sobre o pára-raio. A análise harmônica foi implementada possui como elemento chave o algoritmo de Goertzel, que é um filtro RII capaz de calcular a transformada discreta de Fourier de um sinal periódico, sendo necessários menos recursos computacionais.

Por fim, apresentou-se os resultados obtidos em laboratório e em campo, os quais foram satisfatórios e atenderam as necessidades existentes no início do projeto.

Bibliografia

- [1] Matsuoka, M. “*Nonohmic properties of zinc oxide ceramics*”, Japanese Journal of Applied Physics, vol. 10, n. 6, June, 1971.
- [2] D’Ajuz, A.; Fonseca, C. S.; Carvalho, F. M. C. Amon, J. F^o.; Dias, L. E. N.; Pereira, M. P.; Esmeraldo, P. C. V.; Vaisman, R.; Frontin, S. O. “*Equipamentos elétricos - especificação e aplicação em subestação de alta tensão*”. Rio de Janeiro, Furnas, Universidade Federal Fluminense, 1985
- [3] Gupta, T. K. e Carlson, W. G., “*A grain-boundary defect model for instability/stability of a ZnO varistor*”, Journal of materials science 20, USA, 1985.
- [4] Ramirez, R. W., “*The FFT Fundamentals and Concepts*”. Prentice Hall. 1985.
- [5] Marple, S. L. Jr., “*Digital Spectral Analysis*”. Prentice-Hall, Inc., 1987, pp. 136-44.
- [6] Moraes, H. M. “*Verificação da degradação de blocos cerâmicos à base de óxido através da medição de descargas parciais*”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba, COPELE, 1987.
- [7] Cesi, “*Pára-raios de alta tensão*”. Seminário para Engenheiros da Chesf. Recife-Pe, março, 1989.
- [8] Eda, K. “*Destruction mechanism of zno varistors due to high currents*”. J. Appl. Phys., v. 56. n. 10, p. 2948 - 2954, November, 1984.
- [9] Oppenheim, A. V. e Schafer, R. W., “*Digital Signal Processing*”. Prentice-Hall of India, 1989.
- [10] Gupta, T. K., “*Aplication of zinc oxide surge varistors*”, J. Am. Ceram. Soc., vol. 73, n.7, p.1817-1840, 1990.
- [11] Lundquist, J. “*New Method for measurement of the resistive leakage currents of metal-oxide surge arresters in service*”, IEEE Transacions on Power Delivery, Vol. 5, No. 4, November 1990.
- [12] Franco, J. L. “*Estudo das propriedades elétricas dos varistores de ZnO na região de baixas tensões aplicadas*”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, 1993.
- [13] Costa, E. G., “*Análise do desempenho de pára-raios de óxido de zinco*”, Universidade Federal da Paraíba, Tese de Doutorado, 1999.

- [14] Hinrichsen, V.: “*Metal-Oxide Surge Arresters Fundamentals*”. 1st Edition. Siemens – Power Transmission and Distribution Power Voltage Division. Berlin, 2001.
- [15] Souza, R. T., “*Medição e análise harmônica da corrente de fuga resistiva em varistores de ZnO*” Universidade Federal de Campina Grande, Mestrado, 2004.
- [16] Lira, J. G. A. Sistema de aquisição de dados para monitoramento e diagnóstico remoto das condições de pára- raios de óxido de zinco. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Centro de Engenharia Elétrica e Informática. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- [17] Shirakawa, S., Goto, K., Sakai, M., Endo, F., Kitajima, H., Konayashi, S., Kurita, K., Sakai, M. Maintenance of Surge Arrester by a portable arrester leakage current detector. IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 3, No 3, pp. 998-1003, July 1988.
- [18] Lira, José Gutemberg A., Freire, Raimundo C. S., Costa, Edson Guedes, Macedo, Euler C.T., Luciano, Benedito A. Sistema de avaliação espectral para sistemas elétricos baseado em microcontrolador. 6o Encuentro de Potencia, Instrumentación y Medidas, Uruguai, 2005.