

Exemplar V/S

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP
EXEMPLAR REVISADO
Data de entrada no Serviço: 05/07/01
Ass.: Guilherme

MEDIÇÃO DE CORRENTE – CLASSE 15 kV EM SISTEMAS INDUSTRIAIS COM USO DE DISPOSITIVO ELETRO-ÓPTICO

Eng. HAMILTON CARLOS R. PINTO

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Ruy A. C. Altafim

DEDALUS - Acervo - EESC



31100036699



São Carlos - SP
2001

Class.	TESE-EESC
Cott.	4474
Tombo	T0162/01

st 1196888

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC/USP

P659m

Pinto, Hamilton Carlos Ramos
Medição de corrente : classe 15 kV em sistemas industriais com uso de dispositivo eletro-óptico / Hamilton Carlos Ramos Pinto. -- São Carlos, 2001.

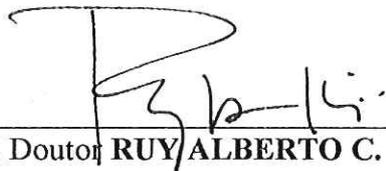
Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2001.
Área : Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Dr. Ruy Alberto Correa Altafim.

1. Medição de corrente. 2. Eletro-óptico.
3. Dispositivo eletro-óptico. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **HAMILTON CARLOS RAMOS PINTO**

Dissertação defendida e julgada em 25-05-2001 perante a Comissão Julgadora:



Prof. Doutor **RUY ALBERTO C. ALTAFIM (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado



Prof. Doutor **DIÓGENES PEREIRA GONZAGA**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

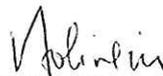


Prof. Doutor **ALEXANDRE PIANTINI**
(Instituto de Eletrotécnica e Energia /USP)

Aprovado



Profa. Associada **VILMA ALVES DE OLIVEIRA**
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica



JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

Meus agradecimentos à minha esposa Cristina e a meus filhos Matheus e Giulia que me apoiaram e muito me incentivaram à realização deste trabalho.

Aos meus pais pelo carinho e pela minha formação.

Agradecimentos

Meus agradecimentos ao Prof. Dr. Ruy Alberto Correa Altafim que não apenas me orientou neste projeto, acima disso demonstrou amizade e compreensão.

Aos professores Gerado Roberto Martins da Costa, Diógenes Pereira Gonzaga, José Carlos Felizatti, Roberto Clarete Pessotta do Departamento de Engenharia Elétrica que muito me ensinaram.

Aos amigos do Departamento Jorge, Alessandro, Cesar, Marcos, Anete, Rene, Alexandre, Ruy, Cacilda, Patricia, Rosane, José Carlos, que me ajudaram e incentivaram nesta empreitada.

Sumário

RESUMO.....	VI
ABSTRACT.....	VII
LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XII
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 - SISTEMAS DE MEDIDA DE CORRENTE ELÉTRICA CONVENCIONAIS .	5
2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	5
2.2. MEDIÇÃO DE CORRENTE COM O EMPREGO DE RESISTORES "SHUNT"	6
2.2.1 "SHUNT" SIMPLES.....	6
2.2.2 "SHUNT" UNIVERSAL.....	8
2.3. MEDIÇÃO DE CORRENTE COM TC.....	8
2.4. MEDIÇÃO DE CORRENTE PELO SISTEMA ELETRO-ÓPTICO	12
CAPÍTULO 3 - COMPONENTES DO CIRCUITO ELETRO-ÓPTICO.....	16
3.1. INTRODUÇÃO.....	16
3.2. SENSOR DE CORRENTE	17
3.2.1. ESTUDO TEÓRICO	18
3.3. FIBRAS ÓPTICAS.....	21
3.3.1 ESTRUTURA FÍSICA	21

3.3.2	TIPOS DE FIBRAS.....	24
3.4.	FOTODETECTORES.....	28
3.4.1	FOTODIODOS.....	28
3.4.2	FOTORESISTORES.....	30
3.5.	FONTES ÓPTICAS.....	31
CAPÍTULO 4 -IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CORRENTE POR DISPOSITIVO ELETRO-ÓPTICO		36
4.1.	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	36
4.2.	DESENVOLVIMENTO DO SENSOR DE CORRENTE PARA LINHA DE DISTRIBUIÇÃO	37
4.2.1	ADAPTAÇÃO DO SENSOR MAGNÉTICO-ÓPTICO.....	37
4.2.2	MONTAGEM DO FOTODETECTOR.....	39
4.2.3	AMPLIFICADORES DE AJUSTES	40
4.2.4	DESENVOLVIMENTO DO DETECTOR DE PICO.....	44
4.2.5	IMPLANTAÇÃO DO VOLTÍMETRO DIGITAL.....	46
4.2.6	ENSAIO E CALIBRAÇÃO UTILIZANDO LED.....	46
4.3.	CALIBRAÇÃO DO PROTÓTIPO	53
4.3.1	ENSAIO E CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE CORRENTE COM LÂMPADA INCANDESCENTE	55
4.3.2	CONFECÇÃO DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO	62
4.3.3	TESTE DA FIBRA.....	63
4.3.4	TESTE DE ISOLAÇÃO	63
CAPÍTULO 5 - SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....		64
5.1.	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	64
5.2.	DESCRIÇÃO GERAL DO PROGRAMA COMPUTACIONAL	65
5.2.1	DESENVOLVIMENTO DA INTERFACE ANALÓGICO/DIGITAL.....	65
5.2.2	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	66
5.2.3	SISTEMA DE ANÁLISE DE DADOS.....	72

Medição de corrente – Classe 15 kV em sistemas industriais com uso de dispositivo eletro-óptico v

5.2.4 SISTEMA DE SAÍDA DE DADOS..... 74

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO..... 77

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 79

Resumo

Foi desenvolvido um sistema eletro-óptico, para medir correntes elétricas em sistemas elétricos de distribuição, possuindo baixo custo, eficiência, versatilidade e segurança. Neste sistema, uma bobina magnética, colocada próximo à linha e conectada em série com um diodo ou uma lâmpada elétrica, gera um sinal ótico que é transmitido por fibra ótica a um fotodetector. Ali o sinal de luz é convertido para um sinal elétrico para ser processado em um microcomputador. Um programa computacional dedicado, também desenvolvido, determina as correntes e também fornece relatórios dos sinais obtidos por longos períodos de tempo.

Abstract

To measure electric currents on power distribution system 15 kV with low costs, efficiency, versatility and security, a magnetic-optic system was developed.

In this system, a magnetic coil close to line and connected in series with a diode or an electric lamp supplies an optic signal that is transmitted by fiber optic to a photo-detector. There the light signal is converted to electric signal to be processed in a microcomputer. A dedicated software for data acquisition that also here was developed determines the currents and also aims at supplying reports on the currents over a long period of time.

Lista de figuras

<u>FIGURA 2.1- SHUNT SIMPLES</u>	6
<u>FIGURA 2.2 – SHUNT UNIVERSAL</u>	8
<u>FIGURA 2.3 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM TC</u>	9
<u>FIGURA 3.1 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO SENSOR DE CORRENTE.</u>	17
<u>FIGURA 3.2 – TRANSFORMADOR DE CORRENTE.</u>	17
<u>FIGURA 3.3 – FOTO DO SENSOR MAGNÉTICO TEKTRONIX.</u>	18
<u>FIGURA 3.4 – ESTRUTURA DA FIBRA ÓPTICA.</u>	21
<u>FIGURA 3.5 – REFLEXÃO INTERNA DO RAIOS INCIDENTE</u>	23
<u>FIGURA 3.6 – GERAÇÃO DE PAR ELÉTRON-LACUNA POR FOTO-IONIZAÇÃO.</u>	28
<u>FIGURA 3.7 ESQUEMA DE LIGAÇÃO DO LDR.</u>	31
<u>FIGURA 3.8 – GRÁFICO TENSÃO DE PICO NO DETECTOR VERSUS CORRENTE DE LINHA</u>	32
<u>FIGURA 3.9 – GRÁFICO TENSÃO DE PICO NO DETECTOR VERSUS CORRENTE DE LINHA</u>	33
<u>FIGURA 3.10 – GRÁFICO POTÊNCIA NA LÂMPADA VERSUS CORRENTE DE LINHA.</u>	33
<u>FIGURA 3.11 – INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO LED</u>	34
<u>FIGURA 4.1 – ESQUEMÁTICO DA PONTA DE PROVA TEKTRONIX A621</u>	37
<u>FIGURA 4.2 – GRÁFICO TENSÃO DA BOBINA DO TC VERSUS CORRENTE DE LINHA</u>	38
<u>FIGURA 4.3 – CONVERSÃO DO SINAL ELÉTRICO EM LUMINOSO.</u>	40
<u>FIGURA 4.4 – CIRCUITO AMPLIFICADOR E FILTRO.</u>	41
<u>FIGURA 4.5 – CURVA DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DO FILTRO</u>	42

<u>FIGURA 4.6 – CURVA DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DO FILTRO.</u>	43
<u>FIGURA 4.7 – CIRCUITO AMPLIFICADOR DE AJUSTE.</u>	44
<u>FIGURA 4.8 – ESQUEMA DO DETECTOR DE PICO</u>	45
<u>FIGURA 4.9 – GRÁFICO VERIFICAÇÃO DA LINEARIDADE DO DETECTOR DE PICO</u>	45
<u>FIGURA 4.10 – CIRCUITO COMPENSADOR DE TEMPERATURA UTILIZANDO O NTC</u>	47
<u>FIGURA 4.11 – GRÁFICO DA VARIAÇÃO DO NTC</u>	48
<u>FIGURA 4.12 – GRÁFICO DA COMPENSAÇÃO DA TEMPERATURA COM O NTC.</u>	48
<u>FIGURA 4.13 – GRÁFICO DA DEPENDÊNCIA DA TEMPERATURA DO LED UTILIZADO</u>	49
<u>FIGURA 4.14 – CIRCUITO DE COMPENSAÇÃO COM LED’S</u>	50
<u>FIGURA 4.15 – GRÁFICO DA RESPOSTA EM RELAÇÃO À TEMPERATURA</u>	51
<u>FIGURA 4.16 – GRÁFICO DA DEPENDÊNCIA DA TEMPERATURA PARA O PROTÓTIPO</u>	52
<u>FIGURA 4.17 – CURVA DE RESPOSTA DO PROTÓTIPO PARA A ESCALA 1</u>	53
<u>FIGURA 4.18 – CURVA DE RESPOSTA DO PROTÓTIPO PARA A ESCALA 2</u>	54
<u>FIGURA 4.19 – CURVA DE CALIBRAÇÃO DO PROTÓTIPO</u>	54
<u>FIGURA 4.20 – CURVA DE RESPOSTA DO MEDIDOR DE CORRENTE</u>	55
<u>FIGURA 4.21 - ENSAIO REALIZADO COM A LÂMPADA X VOLTÍMETRO.</u>	56
<u>FIGURA 4.22 - CURVA RELATIVA AO ENSAIO DA LÂMPADA</u>	57
<u>FIGURA 4.23 - CURVA DE CALIBRAÇÃO DA LÂMPADA</u>	58
<u>FIGURA 4.24 - CIRCUITO OBTIDO A PARTIR DA EQUAÇÃO 4.8.</u>	59
<u>FIGURA 4.25 - LEVANTAMENTO DA CURVA COM O CIRCUITO DE CORREÇÃO</u>	60
<u>FIGURA 4.26 - CURVA LEVANTADA APÓS AJUSTES</u>	60
<u>FIGURA 4.27 - CURVA LEVANTADA DA ASSOCIAÇÃO DE 2 LÂMPADAS EM SÉRIE</u>	61
<u>FIGURA 4.28 - PROTÓTIPO DO CIRCUITO DE MEDIÇÃO ELETRÓPTICO</u>	62
<u>FIGURA 4.29 PLACA DO CIRCUITO DE MEDIÇÃO ELETRÓPTICA</u>	62
<u>FIGURA 4.30 – VERIFICAÇÃO DA ISOLAÇÃO DO DISPOSITIVO</u>	63
<u>FIGURA 5.1 – DIAGRAMA FUNCIONAL DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS</u>	64
<u>FIGURA 5.2 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE AQUISIÇÃO DE DADOS</u>	66

<u>FIGURA 5.3 – DIAGRAMA REPRESENTATIVO DA TRANSFERÊNCIA DE DADOS</u>	67
<u>FIGURA 5.4 – TELA DE APRESENTAÇÃO DO DAQ V 1.0.</u>	67
<u>FIGURA 5.5 – TELA PRINCIPAL DO SOFTWARE DE AQUISIÇÃO DE DADOS</u>	68
<u>FIGURA 5.6 – TELA DE IMPORTAÇÃO DE BANCO DE DADOS.</u>	70
<u>FIGURA 5.7 – OPÇÃO DE LEITURA DA CORRENTE EM TEMPO REAL</u>	71
<u>FIGURA 5.8 – TELA DE LEITURA INSTANTÂNEA DOS VALORES MEDIDOS</u>	71
<u>FIGURA 5.9 – TELA DE TEMPO REAL DAS MEDIDAS DE CORRENTE</u>	72
<u>FIGURA 5.10 – TELA DE COMANDO ANÁLISE DOS VALORES DE CORRENTE OBTIDOS</u>	73
<u>FIGURA 5.11 – TELA DE COMANDO PARA SAÍDA DE DADOS PARA ARQUIVO</u>	74
<u>FIGURA 5.12 – TELA DE COMANDO PARA IMPRESSÃO DA CURVA LEVANTADA.</u>	75
<u>FIGURA 5.13 – TELA DE COMANDO PARA IMPRESSÃO DE RELATÓRIO</u>	75

Lista de tabelas

TABELA 3.1 – CARACTERÍSTICAS DA FIBRA HFBRETD020.....27

TABELA 4.1 – CARACTERÍSTICAS DA PONTA DE PROVA TEKTRONIX39

Lista de símbolos

- λ - Comprimento de onda da luz
- ω - Frequência de oscilação do sistema
- ω_0 - Frequência própria de oscilação do sistema
- μ_0 - Permeabilidade magnética
- θ_1 - Angulo do raio incidente com relação à normal a interface
- θ_2 - Angulo do raio refratado com relação à normal a interface
- θ_r - Angulo de rotação da luz
- Δn - Diferença de índice de refração
- ϵ_r - Permissividade relativa
- AC - Corrente alternada
- AN - Abertura numérica
- DC - Corrente continua
- $d\mathbf{l}$ - Vetor diferencial ao longo da direção de propagação
- E - Campo elétrico aplicado
- E_g - Energia do gap
- E_{rf} - Campo elétrico radiado
- H - Vetor campo magnético
- H_{ext} - Vetor campo magnético externo

- h_f - Constante de Plank
- $i(t)$ - Corrente elétrica instantânea
- I_1 - Corrente primária do TC
- I_2 - Corrente secundária do TC
- m - massa do elétron
- n - Índice de refração do ar
- N - Número de espiras
- n_0 - Índice de refração na ausência de um campo elétrico aplicado
- n_1 - Índice de refração do núcleo da fibra óptica
- N_1 - Número de espiras do primário
- n_2 - Índice de refração da casca da fibra óptica
- N_2 - Número de espiras do secundário
- q - Carga do elétron
- R_{PIN} - Responsividade do fotodiodo
- TC - Transformador de corrente
- V - Constante de Verdet
- V_{AT} - Alta tensão
- V_{BT} - Baixa tensão

Capítulo 1 - Introdução

Atualmente, a maioria das medições de corrente e tensão em linhas de média e alta tensão são realizadas por equipamentos, compostos por elementos redutores, tais como, transformadores de corrente (TC's), transformadores de potencial (TP's), cabos elétricos e conexões. Estes equipamentos são deveras incômodos para muitas situações, principalmente, aquelas em que ficarão instalados por curtos períodos. Como são equipamentos robustos, muitos destes locais exigem a construção de plataformas. Para sua instalação, há também o inconveniente do desligamento das linhas, ou o emprego de equipes especializadas em linha viva [1]. Acrescenta-se o fato de que, tais equipamentos podem ser instalados em ambientes corrosivos ou explosivos (como em certas aplicações industriais), ou até mesmo, sujeitos a distúrbios eletromagnéticos.

Face a todos estes fatores adversos, surge a necessidade de uma nova tecnologia de medição que propicie uma melhor relação custo-benefício, com o emprego de novos equipamentos que possuam confiabilidade, eficiência, sensibilidade, tamanhos reduzidos, baixo custo e características adaptativas. Entende-se por características adaptativas, equipamentos que possam ser facilmente instalados e retirados das linhas, sem os inconvenientes já mencionados.

A partir da década de 70, ocorreram inúmeras pesquisas, impulsionadas pelo grande desenvolvimento das fibras ópticas, utilizadas para medição de corrente em

Altas Tensões. Como resultado do potencial de utilização dos sensores ópticos em sistemas de potência, estes dispositivos têm sido o assunto de pesquisa de muitos grupos de pesquisadores num período de mais de 17 anos, entre pesquisas básicas e o desenvolvimento de protótipos. Entre esses pesquisadores, podemos destacar: Rogers [2], Smith [3], Rashleigh e Ulrich [4], Paap e Harms [5], Laming e Payne [6].

Pesquisas recentes nas áreas ópticas apontam, para um futuro, a substituição dos sistemas convencionais de medição de corrente e tensão, por um sistema inteiramente baseado em fibras e sensores ópticos. Neste sistema, uma fibra óptica conduz uma onda luminosa, que sofre alterações no índice de refração quando próxima a um campo elétrico ou magnético (efeito faraday) e estas alterações que são proporcionais ao valor da corrente elétrica são detectadas em um fotodetector. No fotodetector, o sinal luminoso proporcional a uma tensão ou a uma corrente é novamente decodificado em sinais elétricos.

Sistemas de fibra óptica são imunes a interferências causadas por descargas elétricas atmosféricas, pela ignição de motores, pelo chaveamento de relés e por diversas outras fontes de distúrbios elétricos, que esbarram em sua blindagem natural [Giozza] [7][8]. Estes ruídos elétricos, em um sistema convencional, são bastante inconvenientes e comprometem toda a sua eficiência.

Um outro problema característico dos sistemas convencionais de medição em alta tensão é a isolação entre a alta tensão e o potencial de terra.

Em um sistema eletro-óptico, este inconveniente fica eliminado, pois o material dielétrico (vidro ou plástico) que compõe a fibra-óptica oferece uma excelente isolação elétrica.[3][5][9]

As fibras ópticas possuem alto grau de segurança para a informação transportada, pois não irradiam significativamente a luz propagada. Possuem uma boa tolerância a temperaturas, bem como são menos vulneráveis à ação de líquidos e gases corrosivos, contribuindo assim para uma maior confiabilidade e vida útil dos sistemas. Além disso, elas também proporcionam facilidade de manuseio e baixo custo.

Mediante todas estas qualidades, apresentadas acima, é conveniente supor que um sistema de medição eletro-óptico venha a constituir-se numa alternativa bastante promissora aos sistemas convencionais de medição de corrente e tensão atualmente em uso.

Em uma primeira fase, o uso de fibras ópticas pode se restringir à simples substituição dos cabos metálicos que formam o meio de transmissão. Entretanto, pode-se conceber uma solução global para o sistema, incluindo não apenas os enlaces de transmissão, mas os próprios elementos sensores acoplados diretamente ao meio de transmissão.

Nesse trabalho, dando continuidade aos trabalhos inicialmente apresentados na dissertação de mestrado de Marcos Rodrigues Costa [10] procurar-se-á apresentar um novo protótipo para medição de altas correntes na classe de 15 kV, baseado no emprego de um sistema eletro-óptico que aproveita as excelentes qualidades da linha ótica e as qualidades das bobinas captoras magnéticas.

Este sistema permitirá com vantagens a substituição dos transformadores de corrente (TC's).

Os TC's - para serem instalados - necessitam que o circuito seja seccionado e não esteja energizado. Fato que não ocorre com as bobinas captoras, elementos magnéticos desse novo sistema, por empregarem o sistema tipo garra.

Também este novo sistema poderá ser interligado a um microcomputador para a monitoração dos dados e elaboração de gráficos e relatórios.

Capítulo 2 - Sistemas de medida de corrente elétrica convencionais

Neste capítulo será feita uma abordagem dos processos hoje existentes para a medição de corrente elétrica através de equipamentos convencionais, como também o uso de técnicas eletro-ópticas.

2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Com o crescente aumento da demanda de energia, há necessidade do transporte de grandes blocos de energia pelas linhas de transmissão, o que ocasiona um aumento nos níveis de corrente e tensão bem como na complexidade do sistema operacional, devido a inúmeras interligações que ocorrem entre os sistemas.

Assim sendo, torna-se premente o uso de equipamentos que possam medir de maneira confiável estas grandezas, com exatidão e segurança.

Neste capítulo estaremos descrevendo alguns destes equipamentos, procurando abordar as metodologias de medições em correntes por métodos convencionais, bem como as dificuldades e limitações que eles apresentam.

Estaremos descrevendo também alguns métodos novos, como o uso de sensores eletro-óptico, que possam no futuro a vir substituir os sistemas convencionais.

2.2. MEDIÇÃO DE CORRENTE COM O EMPREGO DE RESISTORES “SHUNT”

Este método de medida, certamente o mais antigo, é empregado quando a intensidade da corrente a medir é maior do que a corrente nominal (I_g) do amperímetro, assim sendo podemos ampliar o campo de medida do instrumento, permitindo a medida de elevados valores de intensidades sem que haja o perigo da queima do instrumento. Este recurso está presente até mesmo nos mais modernos amperímetros existentes no mercado. Estes resistores “shunt” podem ser simples ou de aplicação universal, conforme veremos a seguir.

2.2.1 “SHUNT” SIMPLES

Suponhamos que a corrente a medir é n vezes maior do que a corrente I_g que o instrumento suporta. O “shunt” simples é uma resistência que se liga em paralelo com o amperímetro e cuja função é derivar uma fração da corrente que se quer medir. Conhecida a relação entre a corrente total e a fração que passa pela bobina do instrumento, basta multiplicar-se a leitura pelo valor n chamado “fator de amplificação do instrumento” para se ter o valor da intensidade da corrente procurada.

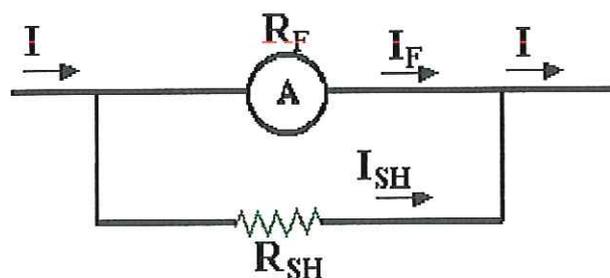


FIGURA 2.1- “SHUNT” SIMPLES

O problema reside, pois, na determinação do valor que deve ter a resistência R_{sh} , a fim de que se possa medir uma corrente n vezes maior que a corrente admissível no amperímetro.

Da Figura 2.1 temos:

$$R_f . I_f = R_{sh} . I_{sh} \quad (2.1)$$

ou

$$R_f . I_f = R_{sh} . (I - I_f) \quad (2.2)$$

mas

$$I = n . I_f \quad (2.3)$$

logo

$$R_f . I_f = R_{sh} . (n . I_f - I_f) \quad (2.4)$$

$$R_{sh} = \frac{R_f}{n-1} \quad (2.5)$$

Por outro lado, conhecido o valor de R_{sh} , pode-se determinar o valor do fator de amplificação:

$$n = \frac{(R_f + R_{sh})}{R_{sh}} \quad (2.6)$$

Em circuitos de corrente alternada é necessário levar em conta as indutâncias do amperímetro e do “shunt”.

Os amperímetros contém, geralmente, vários campos de medida. A cada um corresponde uma resistência “shunt” que fica instalada dentro da caixa do instrumento ou fora dela, conforme o tamanho do “shunt”.

2.2.2 “SHUNT” UNIVERSAL

A substituição de um “shunt” simples por outro, quando se quer mudar o alcance do instrumento não é uma operação cômoda nem rápida. O “shunt” universal evita esses inconvenientes. A simples mudança de posição de uma cavilha permite a mudança do alcance do instrumento. A Figura 2.2 mostra o esquema de um amperímetro com n escalas de leitura mediante a adaptação de um “shunt” universal.

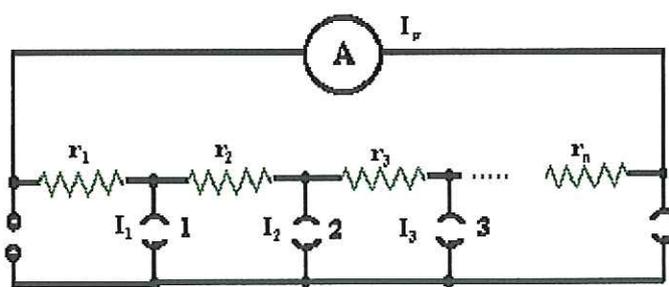


FIGURA 2.2 – “SHUNT” UNIVERSAL

2.3. MEDIÇÃO DE CORRENTE COM TC

Quando os níveis de corrente envolvidos não permitem mais que a conexão direta dos aparelhos de medição e/ou proteção seja realizada, em circuitos de corrente alternada, recorre-se ao emprego de transformadores de corrente (TC's).

A Figura 2.3 representa esquematicamente o transformador de corrente, sendo que este equipamento é constituído por dois enrolamentos, primário e secundário, isolados entre si, mas ligados magneticamente por um núcleo de ferro laminado.

O transformador de corrente possui $N_1 < N_2$ dando assim uma corrente $I_2 < I_1$, sendo por isto considerado na prática como um elemento “reductor de corrente”, pois uma corrente elevada I_1 é transformada para uma corrente reduzida I_2 de valor suportável pelos instrumentos elétricos usuais.

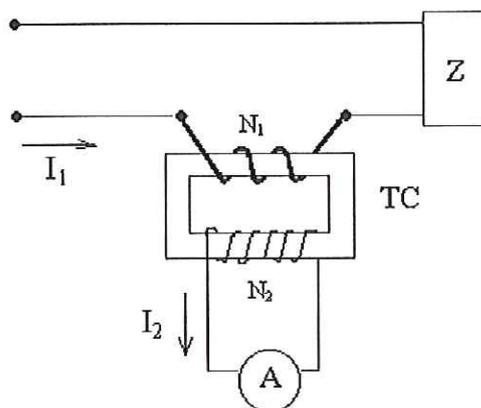


FIGURA 2.3 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM TC

O enrolamento primário é normalmente constituído por poucas espiras, de cobre e de grande secção. Há TC's em que o próprio condutor do circuito principal serve como primário, sendo neste caso considerado como tendo apenas uma única espira. O secundário é composto por muitas espiras, distribuídas e enroladas em forma toroidal para minimizar a impedância de dispersão, conectado a amperímetros, como mostra a Figura 2.3.

Os TC's são projetados e construídos para suportar, em regime permanente, uma corrente maior do que a corrente nominal, sem que nenhum dano lhes seja causado. A relação entre a corrente máxima suportável por um TC e a sua corrente nominal define o “fator térmico” do TC.

Outra característica importante a ser considerada para o funcionamento ideal do transformador de corrente é que o secundário deve possuir uma baixa impedância, ou estar em curto-circuito. Assim vejamos, a corrente I_1 é fixada pela carga ligada ao circuito externo; se $I_2 = 0$, isto é, secundário aberto, não haverá o efeito desmagnetizante desta corrente e a corrente de excitação I_0 passará a ser a própria corrente I_1 , originando em consequência um fluxo ϕ muito elevado no núcleo, cujas consequências podem ser: aquecimento excessivo levando ao rompimento da isolamento, uma f.e.m. induzida E_2 de valor elevado com iminente perigo ao operador.

Assim sendo, com o secundário curto-circuitado, a tensão no enrolamento seria desprezível, se comparada com o valor em circuito aberto, mas a corrente secundária seria proporcional à corrente primária. O secundário deve então ser aterrado, evitando-se um acidente derivado da ruptura na isolamento entre o primário e o secundário.

Outro fator importante para a determinação do tipo de transformador de corrente diz respeito a sua classe de exatidão. As classes de exatidão (0,3; 0,6; 1,2; etc) são definidas por normas técnicas para que possam ser estabelecidas condições sob as quais os TC's devam ser ensaiados. Assim sendo, um TC utilizado em serviço de medição é caracterizado para uma classe de exatidão determinada pelo limite admitido para o erro de relação, e os transformadores utilizados para proteção têm como característica manter o grau de exatidão também para as correntes bem mais elevadas que a corrente nominal.

Para se estabelecer a classe de exatidão de um TC, submete-se o primário aos seguintes ensaios, para cada carga padronizada colocada no seu secundário:

- a) 1º ensaio – 100% de corrente primária nominal;
- b) 2º ensaio – 10% da corrente primária nominal.

Nos transformadores de corrente para serviço de proteção surge um problema que diz respeito à saturação, que pode ser originado por corrente alternada (AC) ou por corrente contínua (DC). A saturação por AC ocorre quando a corrente primária é senoidal sem componente DC, mas é de tal magnitude que o ponto de saturação será atingido, resultando em uma corrente secundária bem menor do que deveria ser e uma forma de onda distorcida. A saturação por DC ocorre quando a corrente primária está deslocada e estabelece uma corrente de polarização ou um fluxo de polarização no núcleo do TC, o que aumenta o problema da saturação por AC.

Quando então um TC está no limiar da saturação, uma determinada corrente de falta primária pode provocar uma severa saturação por (DC) quando esta é adicionada à corrente primária.

Portanto, para fugir da saturação da componente contínua (DC), torna-se um fator de segurança de 100% sobre o cálculo, para assim se ter um ponto-de-joelho mínimo seguro.

Um outro problema surge em decorrência de que qualquer pequena corrente primária magnetiza o núcleo e, conseqüentemente, induz f.e.m. no secundário.

Esta condição faz com que a relação entre corrente primária e secundária seja distanciada de seu valor nominal, conduzindo à introdução de erros de relação e de fase.

2.4. MEDIÇÃO DE CORRENTE PELO SISTEMA ELETRO-ÓPTICO

Devido ao crescimento da tecnologia óptica e também pelas vantagens econômicas que um sistema de medida eletro-óptico possa ter sobre os sistemas convencionais, pesquisas estão crescendo sobre a viabilidade de implantação de um sistema eletro-óptico para medida de altas correntes.

Devido à informação ser transmitida por meio luminoso, não há necessidade de uma isolamento muito sofisticada para a proteção de equipamentos e pessoas, bem como o sistema não é afetado por erros devido a interferências eletromagnéticas geradas por descargas atmosféricas.

Técnica óptica para medida de altas correntes, pode ser dividida em dois segmentos: o primeiro usa uma fonte de luz, usualmente um laser semiconductor ou um LED (“light-emitting diode”), localizado na linha de AT e convertendo o sinal de corrente para sinais luminosos, que serão convertidos novamente em sinais elétricos. Esta técnica será objeto de estudo e apresentação de projeto, portanto será discutida mais adiante.

O segundo método de medida de corrente por efeito eletro-óptico implica na interação de campos elétricos ou magnéticos com o material, resultando na alteração do índice de refração. Estes sistemas são baseados no efeito Faraday que veremos a seguir.[10]

O efeito Faraday, também conhecido como efeito eletro-óptico, ocorre quando um feixe de luz, linearmente polarizado, passa através de um campo magnético externo.[11] Nesta situação, o plano de polarização do feixe de luz é rotacionado, levando a alterações nos índices de refração e conseqüentemente na velocidade de propagação. Os índices de polarização podem ser obtidos por:

$$n_{r,1}^2 = 1 + \frac{4\pi Nq^2}{m} \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 \pm \frac{q\omega H_{ext}}{mc}} \quad (2.7)$$

Onde:

n_r = índice de refração de um feixe de luz linearmente polarizado à direita

n_l = índice de refração de um feixe de luz linearmente polarizado à esquerda

q = carga do elétron

m = massa do elétron

ω_0 = frequência própria de oscilação do sistema

ω = frequência de oscilação do sistema

c = velocidade de propagação da luz no meio

H_{ext} = campo magnético externo

Observando-se que n_r é pouco maior que n_l , tem-se:

$$n_r^2 - n_l^2 = \left(\frac{4\pi Nq^2}{m} \right) \left(\frac{\frac{2q}{mc} H_{ext} \omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 - \left(\frac{q\omega H_{ext}}{mc} \right)^2} \right) \quad (2.8)$$

Desprezando-se o termo no denominador que contém o campo magnético, por apresentar uma contribuição muito pequena, considerando ainda que:

$$n_r^2 - n_l^2 = (n_r + n_l)(n_r - n_l) \quad (2.9)$$

E o índice de refração médio seja

$$n_m = \frac{(n_r + n_l)}{2} \quad (2.10)$$

Tem-se:

$$n_r - n_l = \left(\frac{4\pi Nq^3}{n_m m^2 c} \right) \left(\frac{H_{ext} \omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2} \right) \quad (2.11)$$

Agora, sabendo-se que

$$\frac{2c}{\omega} = \frac{\lambda}{\pi} \quad (2.12)$$

e multiplicando ambos os lados da equação 2.11 por $\omega/2c$, tem-se

$$n_r - n_1 = \left(\frac{2\pi Nq^3}{n_m m^2 c^2} \right) \left(\frac{\omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2} \right) \frac{2c}{\omega} H_{ext} \quad (2.13)$$

Considerando agora V como sendo:

$$V = \left(\frac{2\pi Nq^3}{n_m m^2 c^2} \right) \left(\frac{\omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2} \right) \quad (2.14)$$

Pode-se escrever:

$$n_r - n_1 = \frac{\lambda V H_{ext}}{\pi} \quad (2.15)$$

Onde V é a constante de Verdet. Esta equação descreve o efeito Faraday e para uma melhor visualização pode ser reescrita como segue:

$$\theta_f = \frac{\omega}{2c} (n_r - n_1) l \quad (2.16)$$

Substituindo na equação 2.16 a equação 2.15 e considerando o campo uniforme ao longo de um caminho, tem-se:

$$\theta_f = V H_{ext} l \quad (2.17)$$

A rotação que ocorre em materiais diamagnéticos é proporcional à integral de linha da intensidade do campo magnético H_{ext} , isto é, onde a sensibilidade eletro-óptica é dada pela constante de Verdet V , μ_0 é a permeabilidade magnética

$$\theta_f = \mu_0 V \oint \vec{H}_{ext} \cdot d\vec{l} \quad (2.18)$$

e $d\vec{l}$, um vetor diferencial ao longo da direção de propagação.

Todos os materiais (diamagnéticos, paramagnéticos, ferromagnéticos, plasmas, semicondutores e antiferromagnéticos) exibem o efeito Faraday.

Desta maneira podemos verificar que um sensor de corrente pode ser construído pelo enrolamento de uma fibra óptica monomodo ao redor de um condutor formando um caminho fechado. Pode-se observar pela equação 2.18 que a rotação de Faraday pura depende da corrente envolta pelo caminho óptico e não depende de campos magnéticos de fontes ou correntes externas a ele.[10]

Portanto, de acordo com as equações anteriormente demonstradas, pode-se verificar que quando uma luz polarizada atravessa um campo magnético externo, tem-se uma rotação circular do feixe luminoso que é proporcional ao valor da corrente que o originou.

Capítulo 3 - Componentes do circuito eletro-óptico

Neste capítulo, estaremos apresentando o protótipo do sensor eletro-óptico e discorrendo sobre os conceitos teóricos de seus principais componentes. Também faz parte do escopo deste capítulo uma introdução sobre fibras ópticas e suas diferenciações quanto à capacidade de transmissão e uma comparação entre a utilização dos LED's e Lâmpada à filamento como fonte óptica.

3.1. INTRODUÇÃO

O protótipo do sistema eletro-óptico para medida de correntes em linhas de distribuição de energia pode ser descrito pelo diagrama de blocos da Figura 3.1. Os sinais captados nas linhas, após devidamente reduzidos à faixa de operação do transmissor óptico, serão convertidos de sinais elétricos em luminosos e, posteriormente, transmitidos pela fibra óptica até o receptor onde novamente serão convertidos em sinais elétricos. Estes sinais serão amplificados, sofrerão correção de ganho e injetados em um voltímetro digital. A saída, dessa forma, será um sinal de tensão diretamente proporcional à corrente elétrica, mostrada digitalmente em um voltímetro ou no sistema de aquisição de dados DAq V1.0.

A redução das correntes é feita de forma totalmente passiva e compõe-se de uma garra Tektronix, acoplada aos sensores ópticos, cujos tamanhos e pesos são reduzidos. Algumas alterações mecânicas foram efetuadas para facilitar seu manuseio e instalação, ver Figura 3.3. Já o sistema receptor fica localizado em uma região distante, normalmente na parte inferior de um poste, de uma torre, ou sala de comando, sendo, portanto imune a interferências eletromagnéticas e facilitando a manutenção.

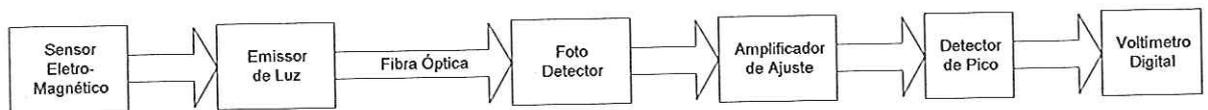


FIGURA 3.1 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO SENSOR DE CORRENTE

3.2. SENSOR DE CORRENTE

O sensor de corrente utilizado neste protótipo consiste basicamente em uma garra Tektronix, modelo A621, que nada mais é que um Transformador de Corrente (TC) constituindo-se de um núcleo ferromagnético em forma toroidal onde são enroladas várias espiras de um fio condutor. Na presença de uma corrente na linha, esta garra gera uma tensão proporcional a esta mesma corrente. A Figura 3.2 ilustra este componente.

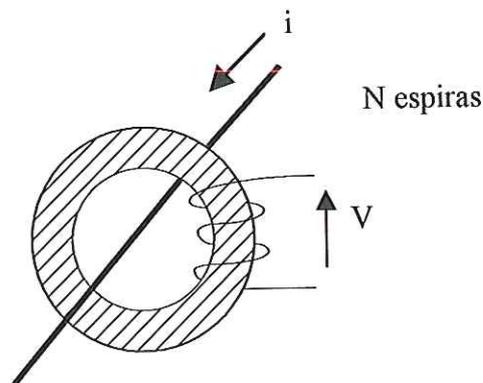


FIGURA 3.2 – TRANSFORMADOR DE CORRENTE.

Este TC possui um volume bem menor e com um nível de isolamento muito inferior ao da própria linha. Isto é possível pois o receptor ficará totalmente isolado da linha de alta tensão através da fibra óptica.

Esta ponta de prova foi cuidadosamente estudada. Posteriormente, apenas o seu núcleo móvel, seu invólucro e suas duas bobinas foram utilizadas.

Para melhor adaptá-la aos propósitos de medida de correntes em linha de distribuição de alta tensão, foram feitas algumas adaptações mecânicas para posicioná-la na extremidade de uma vara de manobra de fenolite a fim de facilitar o transporte e a fixação no local. Lembrando também que trabalha com alta tensão portanto o emprego de tal dispositivo nos permite uma condição segura de trabalho.



FIGURA 3.3 – Foto do sensor magnético Tektronix

3.2.1. ESTUDO TEÓRICO

Para otimizar o sistema, um breve estudo sobre o sensor de corrente foi necessário. Desta forma, estudamos o transformador de corrente cujo condutor primário é o próprio condutor, como a Figura 3.2.

A geração de tensão nos terminais destes sensor a partir de uma corrente de linha é descrito pela lei de Faraday. Assim, temos:

$$V = - \frac{d\lambda}{dt} \quad (3.1)$$

onde:

V = tensão

$\lambda = N \cdot \bar{B} \cdot S$ = fluxo concatenado

N = número de espiras

\bar{B} = fluxo magnético médio do toróide

S = área do toróide

O campo magnético médio no interior do toróide é dado por:

$$\vec{B} = \mu H \quad (3.2)$$

onde

$$\oint \vec{H} \cdot dl = I \quad (3.3)$$

Assumindo que \vec{H} seja praticamente constante no interior do toróide, pode-se escrever:

$$\vec{H} \cdot 2\pi r_m = I \quad (3.4)$$

portanto

$$\vec{B} = \mu \frac{I}{2\pi r_m} \quad (3.5)$$

onde:

$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ = permeabilidade magnética absoluta do material

\bar{I} = corrente média

r_m = raio médio (neste caso, a distância entre o centro do condutor e o centro da seção reta do toróide)

O fluxo concatenado $\lambda(t)$ torna-se:

$$\lambda(t) \cong \frac{N \cdot \mu \cdot i(t) \cdot S}{2 \cdot \pi \cdot r_m} \quad (3.6)$$

e desta forma:

$$v(t) = -\frac{d\lambda}{dt} \cong -\frac{N \cdot \mu \cdot S}{2 \cdot \pi \cdot r_m} \frac{di(t)}{dt} \quad (3.7)$$

sendo que a corrente $i(t)$ é a corrente primária que atravessa o condutor abraçado pelo núcleo toroidal e dado por:

$$i(t) = I_{\max} \cdot \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad (3.8)$$

onde f é a frequência da linha de distribuição. Simplificando a equação 3.8, temos:

$$v(t) \cong -\frac{N \cdot \mu \cdot S}{2 \cdot \pi \cdot r_m} \frac{d}{dt} (I_{\max} \cdot \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)) \quad (3.9)$$

$$v(t) \cong -\frac{N \cdot \mu \cdot S}{r_m} I_{\max} \cdot f \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \sigma) \quad (3.10)$$

Desta expressão, obtemos a tensão eficaz gerada no secundário do transformador, ou seja,

$$V_{rms} \cong -\frac{N \cdot \mu \cdot S \cdot f}{\sqrt{2} \cdot r_m} I_{\max} \quad (3.11)$$

Simplificando a equação 3.11 pelo fator K :

$$K = -\frac{N \cdot \mu \cdot S \cdot f}{\sqrt{2} \cdot r_m} \quad (3.12)$$

temos:

$$V_{rms} \cong K \cdot I_{\max} \quad (3.13)$$

Nota-se que a tensão gerada no secundário possui uma relação linear com a corrente por um fator K , que depende proporcionalmente do número de espiras, da

permeabilidade magnética, da área da seção reta do toróide e da frequência e inversamente proporcional ao raio médio. Essa linearidade, contudo, é restrita à gama de correntes onde a permeabilidade do núcleo pode ser considerada linear.

3.3. FIBRAS ÓPTICAS

3.3.1 ESTRUTURA FÍSICA

Este componente é composto basicamente de um material transparente, flexível e dielétrico, tal como sílica ou plástico, cuja estrutura cilíndrica apresenta dimensões microscópicas [7].

A fibra óptica é formada por uma região central, chamada de núcleo, com índice de refração n_1 , envolta por uma camada, também de material dielétrico, denominada de casca e com índice de refração n_2 , onde a composição do material da casca possui um índice de refração ligeiramente inferior ao do núcleo da fibra óptica.

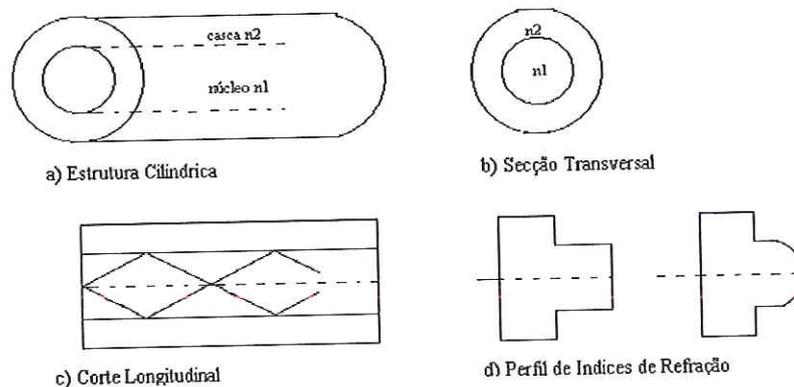


FIGURA 3.4 – Estrutura da fibra óptica

A propagação da energia luminosa na fibra óptica acontece em grande proporção na região do núcleo, sendo que uma pequena parcela se propaga na região da casca. Esta condição é facilitada pela diferença dos índices de refração dos dois

materiais, em que o processo de reflexão total ocorre quando um feixe de luz emerge de um meio mais denso para um meio menos denso.

Esta característica de propagação pode ser obtida com o uso de materiais dielétricos distintos como por exemplo sílica-plástico, ou por um processo de dopagem de materiais semicondutores (c. ex. $\text{GeO}_2, \text{P}_2\text{O}_5$).

Assim sendo, o processo de propagação da luz acontece mediante sucessivas reflexões e refrações segundo a lei de Snell [7]:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} \quad (3.14)$$

onde,

θ_1 = ângulo do raio incidente com relação à normal a interface;

θ_2 = ângulo do raio refratado com relação à normal a interface;

n_1 = índice de refração do meio 1;

n_2 = índice de refração do meio 2.

A Figura 3.5 ilustra este processo, bem como mostra que quando há passagem de luz de um meio mais denso para um meio menos denso, o ângulo do raio refratado θ_2 é maior que o ângulo do raio incidente θ_1 , o que leva a uma condição limite, que para ter uma reflexão total é necessário que o ângulo de incidência seja maior que o ângulo crítico.

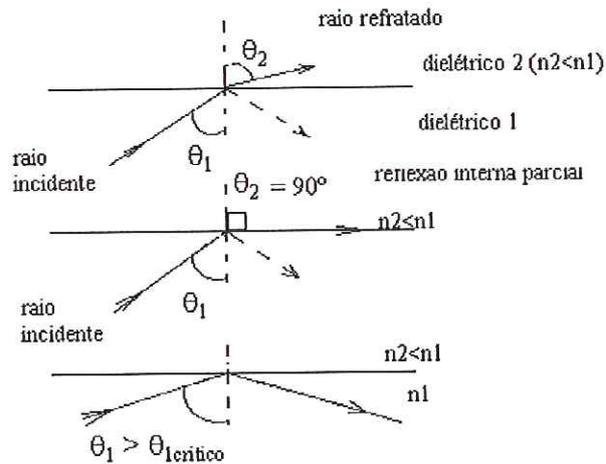


FIGURA 3.5 – REFLEXÃO INTERNA DO RAIO INCIDENTE

Para que se possa ter uma condição de reflexão interna total, é definido um ângulo limite chamado ângulo de aceitação, em que acima deste valor os raios incidentes não satisfazem uma condição satisfatória. Este ângulo define um importante parâmetro de uma fibra óptica que é a sua abertura numérica (AN), cuja expressão é a seguinte:

$$AN = n_1 \times 2\Delta \tag{3.15}$$

onde

$$\Delta \cong \frac{(n_1 - n_2)}{n_1} \tag{3.16}$$

A abertura numérica de uma fibra óptica é muito útil para medir sua capacidade de captar e transmitir luz.

Outros parâmetros que podemos considerar na caracterização de uma fibra óptica são os modos de propagação que representam a diversidade de guias de ondas

presentes na propagação. Estes diversos modos também chamados de frequência normalizada (V), obedecem à seguinte equação:

$$V = \frac{2\pi\alpha}{\lambda} n_1 \sqrt{2\Delta} \rightarrow \Delta \ll 1 \quad (3.17)$$

onde

α = raio do núcleo da fibra;

λ = comprimento de onda da luz transmitida

3.3.2 TIPOS DE FIBRAS

De acordo com os conceitos vistos anteriormente, as variações dos índices de refração podem ocorrer de maneira contínua, caracterizando um tipo de perfil de fibra gradual, ou descontínua, dando origem ao modo degrau. Esta característica do perfil do índice influencia a capacidade de transmissão da fibra óptica.

As fibras ópticas podem ser classificadas em: monomodo, em que temos a propagação da onda em um único modo de propagação, e as multimodo que podem ser degrau ou índice gradual. As fibras ópticas multimodo degrau são fabricadas de uma maneira mais simples, por apresentarem diâmetro do núcleo relativamente grande, em torno de 50 μ m a 200 μ m. Possuem uma alta abertura numérica, facilitando o acoplamento destas fibras com fontes de baixa intensidade luminosa, que constitui sua principal característica, pois assim sendo é grande a sua capacidade de captar a energia luminosa [7].

As fibras multimodo de índice gradual apresentam uma caracterização um pouco mais complexa que as de índice degrau, oferecendo uma maior capacidade de transmissão. Suas dimensões são menores, mas suficientes para facilitar as conexões

e acoplamentos. Possui abertura numérica não muito grande, para garantir uma banda passante adequada às aplicações.

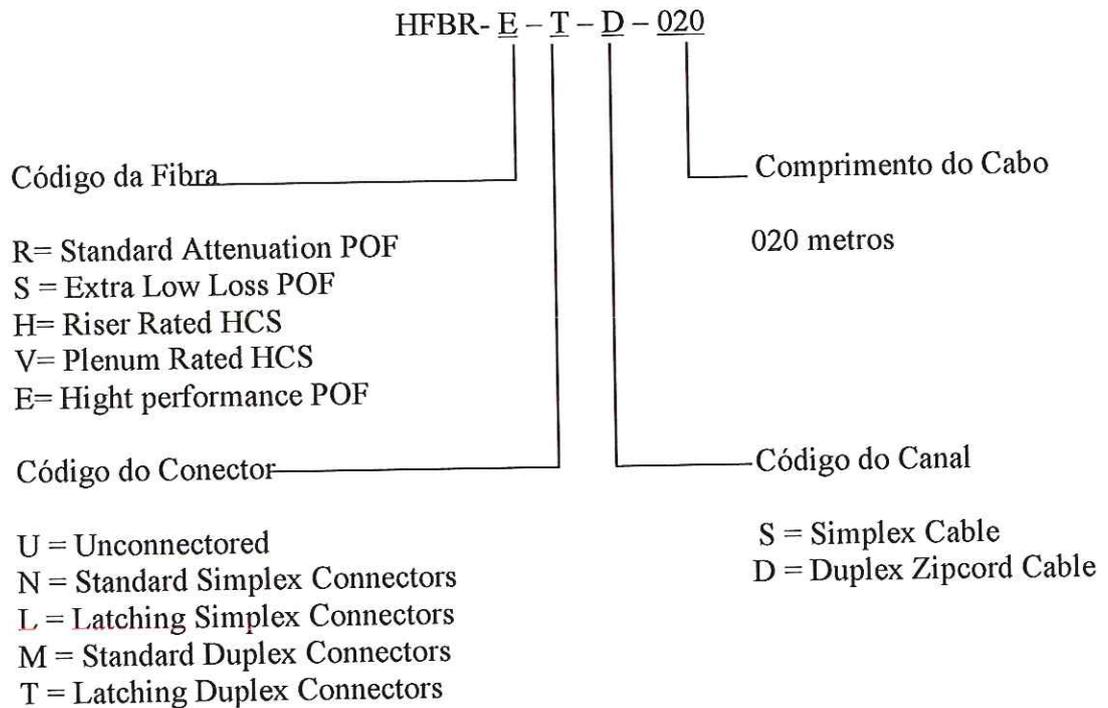
Por último, têm-se as fibras monomodo que, como foi dito anteriormente, apresentam um único modo de propagação mas possuem grande capacidade de transmissão e dimensões reduzidas. O inconveniente neste tipo de fibra é a conexão à fonte luminosa ou ao detector, devido a suas dimensões. Porém, com o avanço tecnológico, esta dificuldade vem sendo superada, tornando este tipo de fibra uma alternativa obrigatória aos futuros sistemas.

As perdas por dispersão em uma fibra óptica constituem um outro parâmetro a ser considerado na determinação da aplicação do tipo de fibra. Este fenômeno é o resultado dos diferentes atrasos de propagação dos modos que transportam a energia luminosa, limitando sua capacidade de transmissão.

Existem dois mecanismos da dispersão em fibras ópticas que são: dispersão modal ou intramodal que se caracteriza por afetar a transmissão em fibras multimodo, em que cada modo apresenta uma velocidade diferente para o mesmo comprimento de onda, resultando em diferentes atrasos em cada modo de propagação. E temos a dispersão intramodal que é resultante da dependência da velocidade de propagação de um modo individual com relação ao comprimento de onda.

No nosso trabalho de dissertação, utilizamos uma fibra óptica da Hewlett Packard modelo HFBR-ETD020, cujas características estão apresentadas na tabela III-1. A serie HFBR-R/EXXYYY é composta de um cabo de fibra-óptica plástica (POF) construída em um comprimento único e isolada por uma camada de polyethylene preto. A forma construtiva deste cabo pode ser de uma ou duas fibras.

Neste último caso as fibras individuais são unidas de um modo único. Esta série apresenta ainda dois tipos de fibras diferenciadas pelo padrão de atenuação, ou seja: a “low cost standard POF” (HFBR-R) com 0,22 dB/m de atenuação típica e a “high performance extra low loss POF” (HFBR-E), que utilizamos no nosso projeto, com 0,19 dB/m de atenuação típica. O conector utilizado é o estilo duplo, que proporciona uma terminação segura quando da possibilidade de inserções incorretas. Abaixo apresentamos os códigos de especificação do cabo de fibra óptica:



Plastic Optical Fiber Specifications: HFBR-R/EXXYYY

Absolute Maximum Ratings

Parameter		Symbol	Min.	Max.	Unit	Note
Storage and Operating Temperature		$T_{S,O}$	-55	+85	°C	
Recommended Operating Temperature		T_O	-40	+85	°C	
Installation Temperature		T_I	-20	+70	°C	1
Short Term Tensile Force	Single Channel	F_T		50	N	2
	Dual Channel	F_T		100	N	
Short Term Bend Radius		r	25		mm	3, 4
Long Term Bend Radius		r	35		mm	
Long Term Tensile Load		F_T		1	N	
Flexing				1000	Cycles	4

Mechanical/Optical Characteristics, $T_A = -40$ to $+85^\circ\text{C}$ unless otherwise specified

Parameter		Symbol	Min.	Typ. ⁽⁵⁾	Max.	Unit	Condition
Cable Attenuation	Standard Cable, Type "R"	α_O	0.15	0.22	0.27	dB/m	Source is HFBR-15XX (660 nm LED, 0.5 NA) $\ell = 50$ meters
	Extra Low Loss, Type "E"		0.15	0.19	0.23		
Reference Attenuation	Standard Cable, Type "R"	α_R	0.12	0.19	0.24	dB/m	Source is 650 nm, 0.5 NA monochromator, $\ell = 50$ meters Note 7, Figure 1
	Extra Low Loss, Type "E"		0.12	0.16	0.19		
Numerical Aperture		NA	0.46	0.47	0.50		>2 meters
Diameter, Core and Cladding		D_C	0.94	1.00	1.06	mm	
Diameter, Jacket		D_J	2.13	2.20	2.27	mm	Simplex Cable
Propagation Delay Constant		l/v		5.0		ns/m	Note 6
Mass per Unit Length/Channel				5.3		g/m	Without Connectors
Cable Leakage Current		I_L		12		nA	50 kV, $\ell = 0.3$ meters
Refractive Index	Core	n		1.492			
	Cladding			1.417			

TABELA 3.1 – CARACTERÍSTICAS DA FIBRA HFBRETD020

3.4. FOTODETECTORES

Este componente é muito importante no circuito do receptor óptico, pois é o responsável pela conversão dos sinais luminosos provenientes da fibra óptica, em sinais elétricos. Como exemplo deste tipo de componente podemos citar os LDR (Resistor Dependente de Luz) e os fotodiodos.

3.4.1 FOTODIODOS

Os fotodiodos são componentes que operam pelo mecanismo da fotoionização. Se iluminarmos uma junção $p-n$ deste semiconductor, reversamente polarizada, a corrente varia quase linearmente com o fluxo luminoso [7].

Este processo de conversão chamado de fotoionização acontece quando a energia do fóton é usada para tirar o elétron da banda de valência, para a banda de condução, como mostra a Figura 3.6, onde E_g representa a energia do gap e h_f uma constante de Plank.

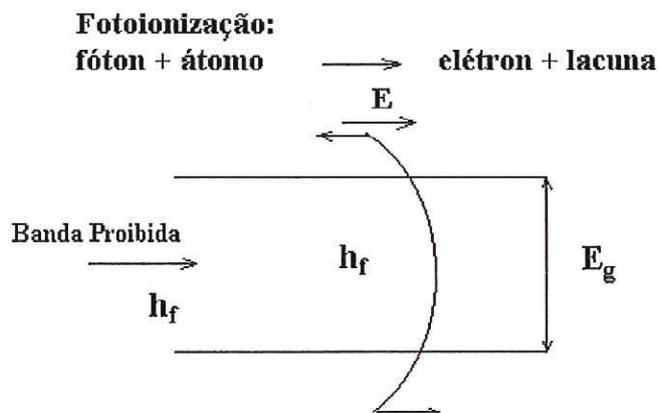


FIGURA 3.6 – GERAÇÃO DE PAR ELÉTRON-LACUNA POR FOTO-IONIZAÇÃO

Estando o semiconductor polarizado reversamente, a barreira de potencial associada à junção $p-n$ será aumentada, pois a tensão positiva no lado n em relação ao lado p atrai os elétrons do lado n e repelem as lacunas do lado p para longe da junção, alargando a região esvaziada. Assim, para que haja a corrente elétrica, é

preciso que um campo elétrico movimente os portadores de carga, gerados pelos fótons, antes que se recombinem no interior do dispositivo.

Para que haja uma melhor absorção dos portadores de carga gerados pelos fótons, é necessário que o dispositivo apresente uma concentração em regiões nas quais haja campo elétrico e poucos portadores com os quais os elétrons e lacunas possam se recombinar. Estes dispositivos são recobertos na junção *p-n* com um plástico transparente, por onde há a incidência da radiação luminosa; e as demais partes são pintadas de preto ou encapsuladas em um invólucro metálico.

O dispositivo completo é extremamente pequeno e suas dimensões são milimétricas [12].

Pode-se caracterizar um fotodiodo pelos seguintes parâmetros: dimensões físicas, modo de operação, velocidade de operação, mas um parâmetro fundamental para o bom desempenho deste componente está relacionado à boa sensibilidade, ou seja, a corrente produzida por fluxo luminoso para uma determinada região de comprimento de onda da fonte óptica.

Para melhorar o desempenho de um fotodiodo *PN*, desenvolveu-se o fotodiodo *PIN* e o fotodiodo de Avalanche (*APD*).

O fotodiodo *PIN* é composto por uma camada de alta resistência (*I*), intercalada pelas camadas de baixa resistência *P* e *N*. Quando aplica-se uma tensão reversa, a camada (*I*) torna-se repleta de portadores.

A eficiência do fotodiodo *PIN* pode ser expressa em função da sua responsividade R_{pin} , definida em relação à corrente gerada e à potência óptica incidente, ou também expressa pela expressão:

$$R_{pin} = \frac{I}{P} \quad (3.18)$$

onde,

P = Potência óptica incidente,

I = corrente elétrica gerada.

O fotodiodo de Avalanche, ou *APD* (Avalanche Photodiode), também foi desenvolvido para aumentar a eficiência do fotodiodo. Neste dispositivo, o processo da condução de corrente, ora chamado de corrente secundária, para distinguir-se da corrente primária, gerada inicialmente pela absorção dos fótons, origina-se em decorrência da geração de múltiplos elétrons na saída para cada fóton incidente. Aumentando o valor da tensão reversa aplicada ao diodo, o campo máximo chegará a um valor no qual a energia cinética transferida aos portadores seja suficiente para que as colisões arranquem mais elétrons dos átomos da rede cristalina, gerando novos pares elétron-lacuna. Como esses são criados na região de alto campo, eles também podem, por sua vez, gerar novos portadores, num processo de crescimento por avalanche. Para estes dispositivos a tensão de polarização da fonte é relativamente alta, em torno de 80 a 400V e também apresentam alto custo.

Desta forma os fotodiodos *PIN* são mais recomendados para curtas distâncias de transmissão com baixos comprimentos de onda que os fotodiodos *APD*, adaptados para aplicações de longas distâncias e amplos comprimentos de ondas.

3.4.2 FOTORESISTORES

Os fotoresistores também conhecidos por *LDR's* (Light Dependent Resistor) são componentes obtidos a partir de sulfeto de cádmio, apresentando este elemento a propriedade de aumentar sua condutividade quando exposto a radiações eletromagnéticas (luz) [13].

Este sensor consiste essencialmente de um filme, onde seu tamanho e forma determinam suas características de sensibilidade e resistência variável com a luz.

São vários os processos de medida a serem empregados, no entanto foi utilizado no nosso projeto o esquema conforme a Figura 3.7, onde a tensão da fonte E resulta em uma corrente no sensor I_S , sendo R_L o resistor de carga e R_S a resistência do *LDR*.

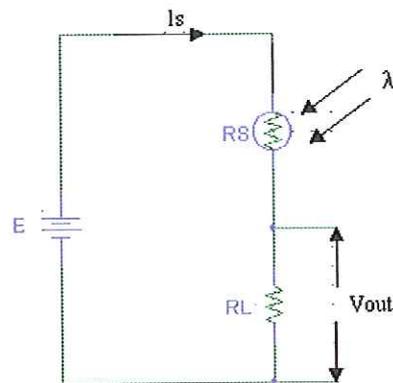


FIGURA 3.7- ESQUEMA DE LIGAÇÃO DO LDR

A tensão de saída V_{out} é determinada segundo a equação

$$V_{out} = \frac{ERL}{R_S + RL} \quad (3.19)$$

onde V_{out} será alto para uma condição alta de iluminação e baixo para uma condição baixa de iluminação.

3.5. FONTES ÓPTICAS

Para o desenvolvimento do nosso projeto foram utilizados dois tipos de fontes de emissão de luz : *LED* “(Light-Emitting Diodes)” e lâmpada incandescente.

Como veremos no CAPÍTULO IV, a escolha do tipo de fonte óptica dependerá da faixa de leitura. Para pequenos valores de corrente, utilizaremos o *LED*, pois este requer pouca potência, como ilustra a Figura 3.8.

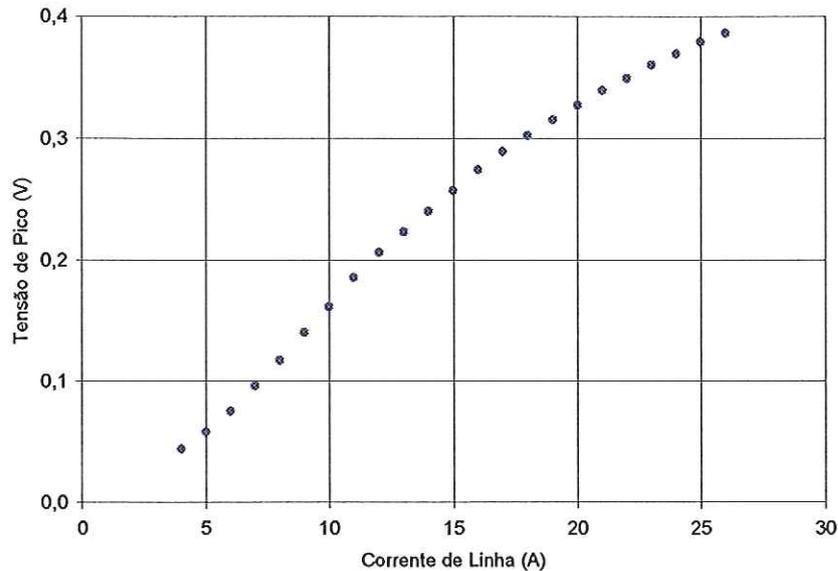


FIGURA 3.8 – GRÁFICO TENSÃO DE PICO NO DETECTOR VERSUS CORRENTE DE LINHA NO LED

Observa-se pela Figura 3.8 que o *LED* apenas começa a acender a partir de uma corrente de 4 A. Valores inferiores não são possíveis de serem lidos. Quanto ao emprego da lâmpada incandescente como fonte óptica, observa-se pela Figura 3.9, que requer uma corrente de linha maior (17A) para poder acender e uma potência mínima de 500mW, de acordo com a Figura 3.10.

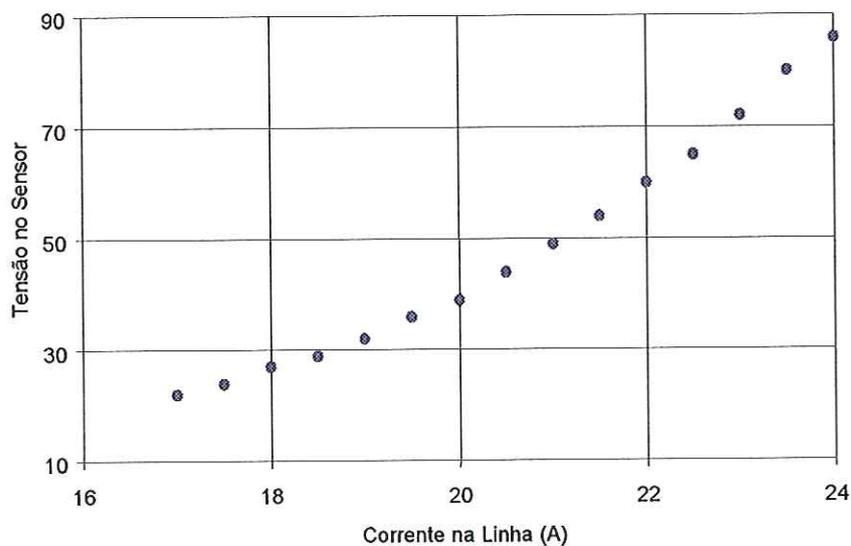


FIGURA 3.9 – GRÁFICO TENSÃO DE PICO NO DETECTOR VERSUS CORRENTE DE LINHA NA LÂMPADA INCANDESCENTE

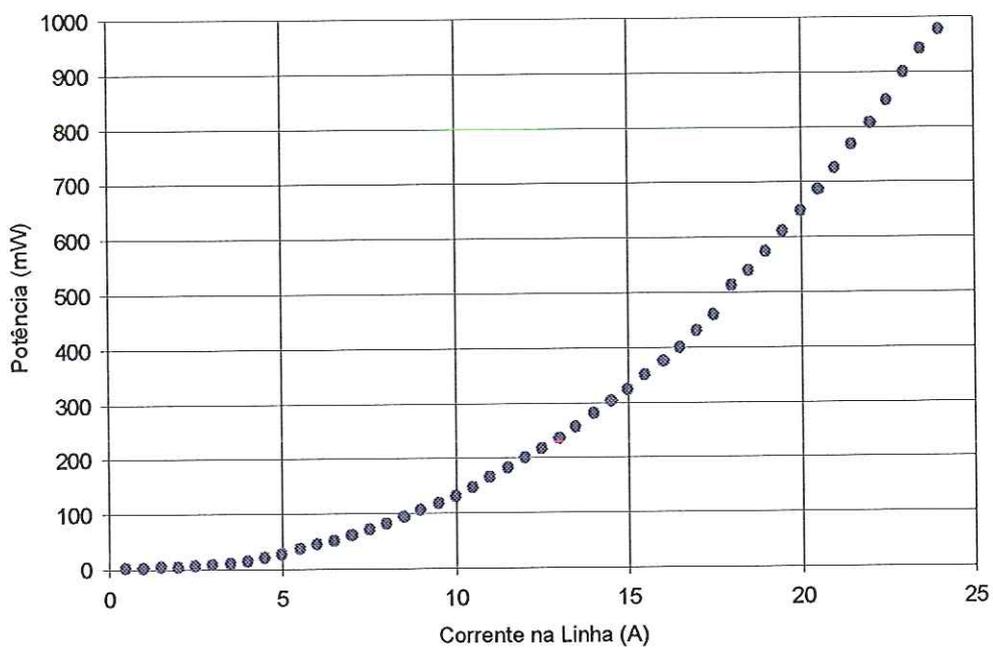


FIGURA 3.10 – GRÁFICO POTÊNCIA NA LÂMPADA VERSUS CORRENTE DE LINHA

Como anteriormente visto, um dos fatores na determinação da escolha da fonte óptica dependerá da faixa de corrente a ser lida.

Uma característica da emissão óptica do *LED* é a relação relativamente linear entre a corrente de entrada e a potência óptica de saída, ou seja, mantendo-se constante a corrente de entrada do *LED*, a quantidade de elétrons injetados, que são convertidos em fótons, é quase que independente do nível da corrente elétrica, resultando uma característica estática aproximadamente linear. Esta característica será demonstrada nesse projeto no CAPÍTULO IV.

Entretanto, um fator que poderia inviabilizar o uso do *LED* nesse projeto de Medição de Corrente com o uso de dispositivos eletro-ópticos está relacionado com a temperatura, já que foram feitos vários ensaios e constatou-se que, para uma variação de 35°C, ocorre uma mudança de leitura em torno de 100mV como mostra a Figura 3.11, o que causa um erro apreciável na leitura.

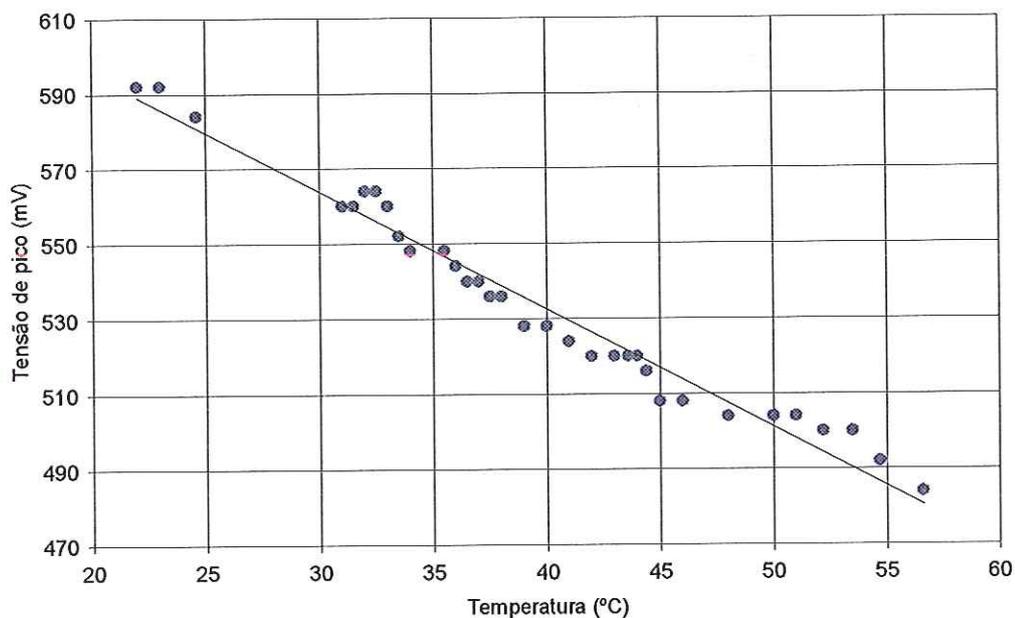


FIGURA 3.11 – INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO *LED*

Portanto, nesta dissertação foram exploradas duas soluções:

- ✓ a substituição do *LED* por um outro componente que não sofra alterações nas suas características com as variações de temperatura ambiente;
- ✓ ou a utilização de um componente compensador de temperatura passivo, pois é objetivo do trabalho não ter nenhum sistema ativo em contato com a linha a ser medida.

Um componente luminoso que não é influenciado pela temperatura externa é a lâmpada incandescente, que contém um filamento operando em temperaturas acima de 2.000 °C. Testes iniciais mostraram sua viabilidade técnica. No entanto, um problema surgido para o uso de lâmpada incandescente foi com relação ao tipo de fotodetector utilizado. Sabe-se que o espectro de luz emitido pela lâmpada corresponde à luz branca, e o sensor utilizado anteriormente somente era sensível à parte do espectro de luz correspondente ao vermelho e infravermelho, pois se utilizava do *LED*. Para sanar este problema, utilizou-se um *LDR* (Resistor Dependente de Luz) cujo espectro de luz coincide com o da lâmpada.

O uso de lâmpada incandescente resolve o problema da influência da temperatura externa, porém a dificuldade que surge no momento é com relação à linearidade do circuito, pois a curva de calibração apresentada no CAPÍTULO IV mostra uma faixa não linear que corresponde às baixas tensões e também a corrente inicial da linha ser muito elevada.

Capítulo 4 - IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CORRENTE POR DISPOSITIVO ELETRO-ÓPTICO

Neste capítulo será descrita a construção de um protótipo para medição de corrente por dispositivo eletro-óptico, bem como os ensaios de laboratório.

4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

As atividades realizadas correspondem à implementação do sistema de medição de corrente por dispositivo eletro-óptico para fins industriais. Conforme foi descrito no CAPÍTULO III, o emprego de uma fonte óptica como o LED resulta em uma variação das medidas elétricas devido à influência da temperatura.

Assim sendo, nesta dissertação, elaborou-se o estudo para a troca deste tipo de fonte por LÂMPADA INCANDESCENTE, bem como o emprego de um dispositivo que compense o efeito da variação da temperatura, como o NTC (Negative Temperature Coefficient). Também foi feita uma análise da calibração do sistema, empregando tanto o LED como fonte óptica como a LÂMPADA INCANDESCENTE.

4.2. DESENVOLVIMENTO DO SENSOR DE CORRENTE PARA LINHA DE DISTRIBUIÇÃO

4.2.1 ADAPTAÇÃO DO SENSOR MAGNÉTICO-ÓPTICO

Como sensor magnético empregou-se a ponta de prova Tektronix A621, cujos dados encontram-se na Tabela IV-1, retirando-se todo o seu circuito eletrônico associado. Desta forma ela tornou-se basicamente um núcleo móvel com duas bobinas secundárias, como ilustra a Figura 4.1.

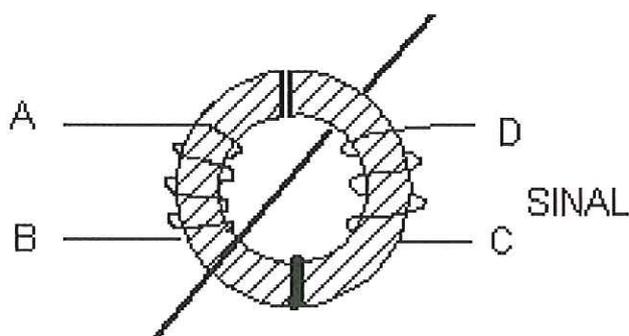


FIGURA 4.1- ESQUEMÁTICO DA PONTA DE PROVA TEKTRONIX A621

Inúmeros foram os testes efetuados com esta ponta de prova. Primeiramente, suas bobinas foram conectadas em diferentes configurações, com o intuito de determinar a tensão ótima para uma dada corrente primária.

Com suas duas bobinas abertas, inúmeras correntes primárias de valor crescente foram aplicadas, notando-se que a tensão nos terminais era diretamente proporcional à corrente. No entanto, foi verificado um inconveniente: a partir de um valor de corrente, não se conseguia abrir as garras da ponta de prova, ou seja as bobinas móveis não se separavam. Contudo, quando uma das bobinas secundárias é curto-circuitada, o fluxo magnético torna-se estável para correntes elevadas e esse inconveniente desaparece.

Com essa ligação estabelecida, foi acoplado aos terminais da bobina secundária um “LED”. Variando-se a corrente primária no circuito, obteve-se o gráfico tensão nos terminais do diodo por corrente primária, como mostra a Figura 4.2.

Este resultado mostrou que a tensão, nos terminais da bobina, era insuficiente para excitar o “LED”. Somente quando a corrente estava situada acima de 90 A os valores de excitação eram obtidos. Este era um grave problema, porque o objetivo era, justamente, eliminar qualquer amplificação ativa diretamente em contato com a alta tensão.

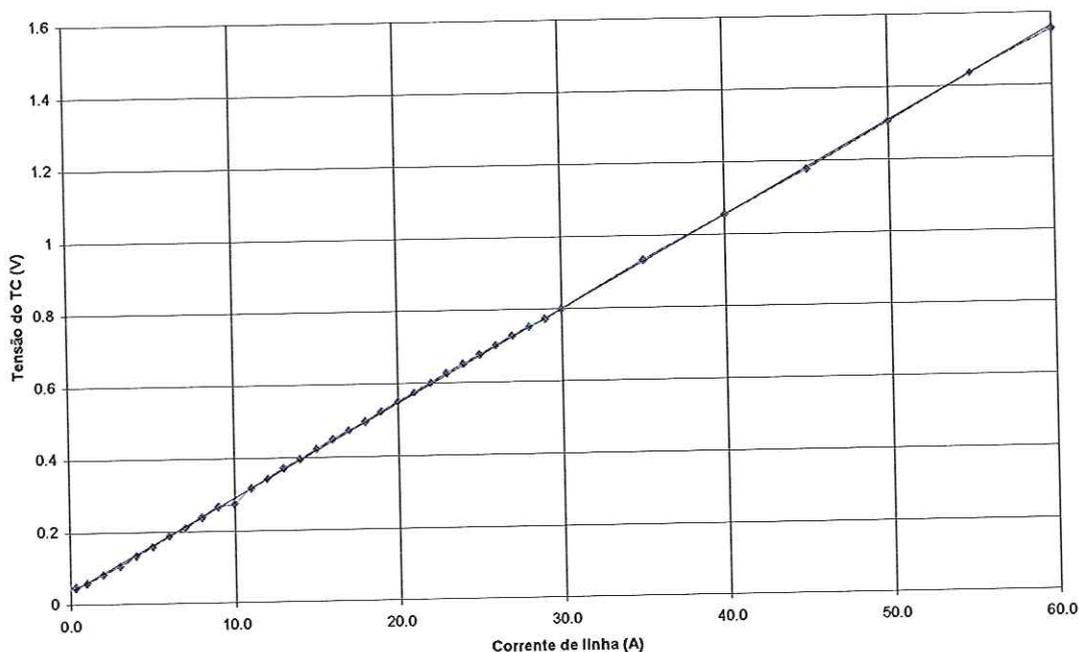


FIGURA 4.2 – GRÁFICO TENSÃO DA BOBINA DO TC VERSUS CORRENTE DE LINHA

Para solucionar esse problema, no lugar do curto-circuito da bobina secundária foi colocado um resistor. Assim, o fluxo magnético poderia ser em parte limitado e ao mesmo tempo fornecer uma tensão suficiente para excitar o LED.

Para determinar qual o resistor a ser utilizado, primeiramente escolheu-se a escala de corrente a ser utilizada, ou seja, quais os valores de corrente que deveriam ser lidos. Após isso, escolheu-se o resistor que melhor se adaptava a esta escala.

Nesse caso, adotou-se o valor do resistor como 247 Ω em paralelo com a bobina, e o outro terminal em paralelo com o LED.

Na tabela abaixo estão as características da ponta de prova da Tektronix – A621:

Características da ponta de prova Tektronix A621	
Potência	1/10/100 mVA
Precisão	± 2 p/ 1mV/A e 10 mV/A
A	± 3 p/ 100 mV/A
Máxima corrente de Trabalho	2000 APICO p/ 1 mV/A
A	1000 APICO p/ 1 mV/A
A	200 APICO p/ 10 mV/A
A	20 APICO p/ 100 mV/A
Máxima tensão de trabalho	440 Vrms
Faixa de frequência	5 Hz à 50 kHz

TABELA 4.1 – CARACTERÍSTICAS DA PONTA DE PROVA TEKTRONIX

4.2.2 MONTAGEM DO FOTODETECTOR

O sinal de luz gerado e transportado pela fibra óptica deve ser novamente convertido em sinal elétrico a fim de que possa ser lido no voltímetro ou num sistema informatizado. Para este fim, o componente utilizado foi o LDR (Light Dependent Resistor).

O LDR é um componente sensível ao espectro de luz visível, e pode ser utilizado tanto para o uso do LED, como para a LÂMPADA INCANDESCENTE.

Com a utilização da lâmpada, um fato interessante foi observado: a frequência obtida do foto detector era o dobro da frequência original.

Para uma frequência da linha igual a 60Hz, o que se observou no fotodetector foi um sinal de 120Hz.

A onda senoidal proveniente do sensor de corrente possui uma semi-onda com tensão positiva e outra semi-onda com uma tensão negativa. Entretanto, o sinal luminoso não se comporta como o sinal elétrico; para a luz transmitimos apenas potência positiva, isto é, a lâmpada só envia energia para o sistema. Assim, as semi-ondas com tensão positiva e negativa são transformadas em um sinal luminoso de intensidade positiva, como mostra a Figura 4.3.

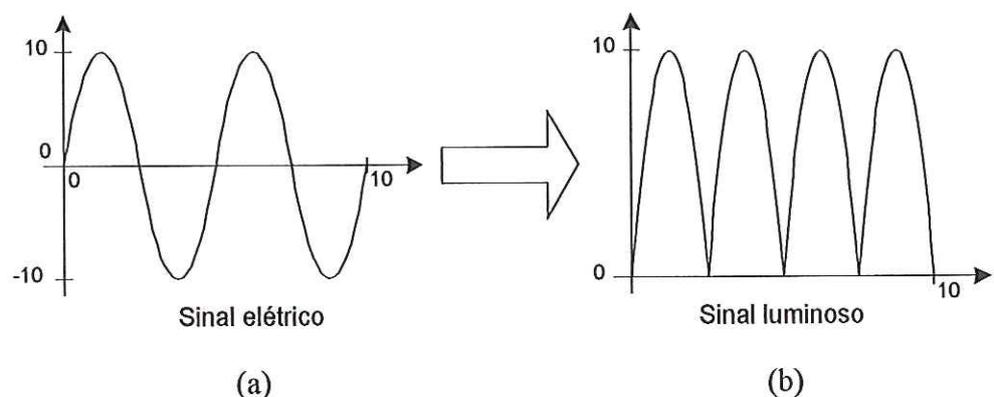


FIGURA 4.3 – CONVERSÃO DO SINAL ELÉTRICO EM LUMINOSO.

Devido à inércia do LDR e da lâmpada e em virtude do “pico” (crista inferior) presente na onda, resulta um sinal de dupla frequência com características senoidais, como indica na Figura 4.3 (b).

4.2.3. AMPLIFICADORES DE AJUSTES

Como o sinal obtido do sensor tem intensidade muito pequena (alguns milivolts), o sinal elétrico do fotodetector é amplificado e as não linearidades do sistema corrigidos, garantindo uma resposta linear na faixa de interesse. Nesta etapa também foram acoplados filtros para atuarem no sinal de interesse.

Assim, possíveis ruídos e sinais indesejáveis, que possivelmente interfeririam na medida, puderam ser eliminados por este filtro.

Para a utilização do LED como emissor de luz utilizou-se um filtro de 60Hz, como ilustra a Figura 4.4.

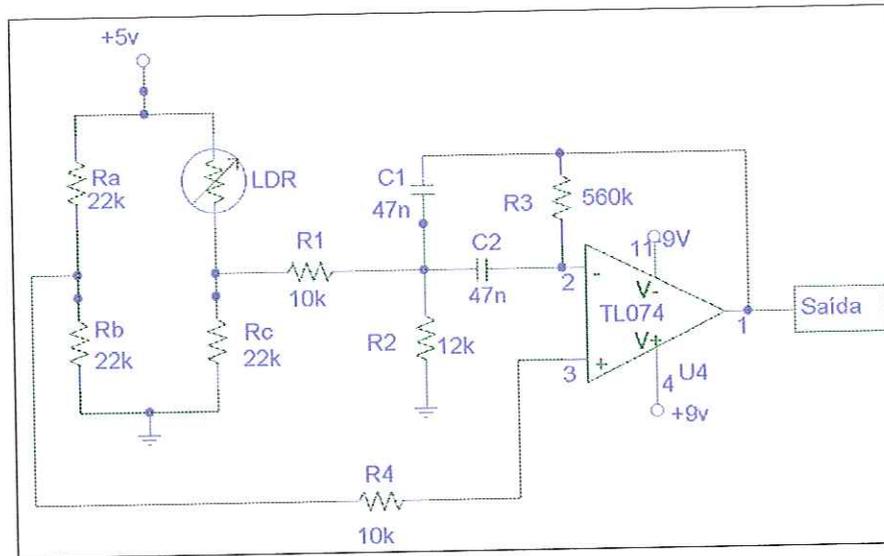


FIGURA 4.4 – CIRCUITO AMPLIFICADOR E FILTRO.

Os valores de C_1 , C_2 , R_1 , R_2 e R_3 foram escolhidos de modo que este filtro possua um fator de qualidade $Q = 10$ e ganho na frequência central $H_0 = 10$. As equações utilizadas foram as seguintes:

$$R_1^* = R_1 + \frac{R_C \cdot R_{LDR}}{R_C + R_{LDR}} \quad (4.1)$$

$$R_1^* = \frac{Q}{H_0 \cdot \omega_0 \cdot C} \quad (4.2)$$

$$R_2 = \frac{H_0 \cdot R_1}{2 \cdot Q^2 - H_0} \quad (4.3)$$

$$R_3 = 2 \cdot H_0 \cdot R_1 \quad (4.4)$$

Fixando o valor de $C = C_1 = C_2 = 47nF$, utilizou-se as equações apresentadas acima, conjuntamente com programa Spice-Versão 8.0 (Avaliação), para determinar-se os valores destes componentes. A melhor solução encontrada com os cálculos e com a simulação foi os seguintes valores de componentes comerciais:

$$R_1 = 10k\Omega$$

$$R_2 = 7,5k\Omega$$

$$R_3 = 560k\Omega$$

$$R_4 = 10k\Omega$$

$$C_1 = C_2 = 47nF$$

A curva de resposta em relação à frequência é mostrada na Figura 4.5 simulado no programa SPICE.

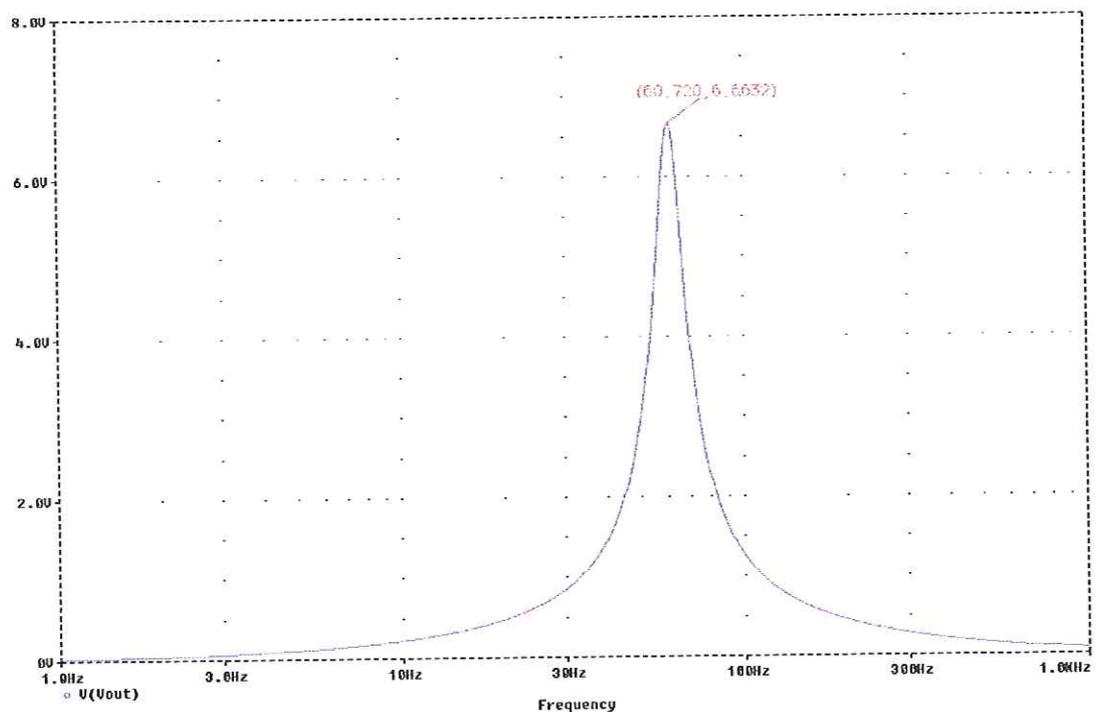


FIGURA 4.5 – CURVA DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DO FILTRO

Nota-se que o valor máximo desta curva ocorre na frequência de 60,720Hz, valor muito próximo da frequência da linha, isto é, 60Hz. Essa pequena diferença ocorre por estarem sendo utilizados componentes comerciais.

Para a lâmpada como emissor de luz, empregou-se as mesmas equações (4.1, 4.2, 4.3 e 4.4). Como visto no item anterior, a lâmpada gera uma frequência de 120Hz com distorções, e não 60 Hz como no caso anterior.. Assim, os valores dos componente para este filtro, para um fator de qualidade de $Q = 10$ e ganho na frequência central $H_0 = 10$, os componentes apresentam os seguintes valores comerciais:

$$R_1 = 10k\Omega$$

$$R_2 = 1,5k\Omega$$

$$R_3 = 560k\Omega$$

$$R_4 = 10k\Omega$$

$$C_1 = C_2 = 47Nf$$

Com estes valores, foi simulado no programa Spice este filtro, cuja curva de resposta em frequência encontra-se na Figura 4.6:

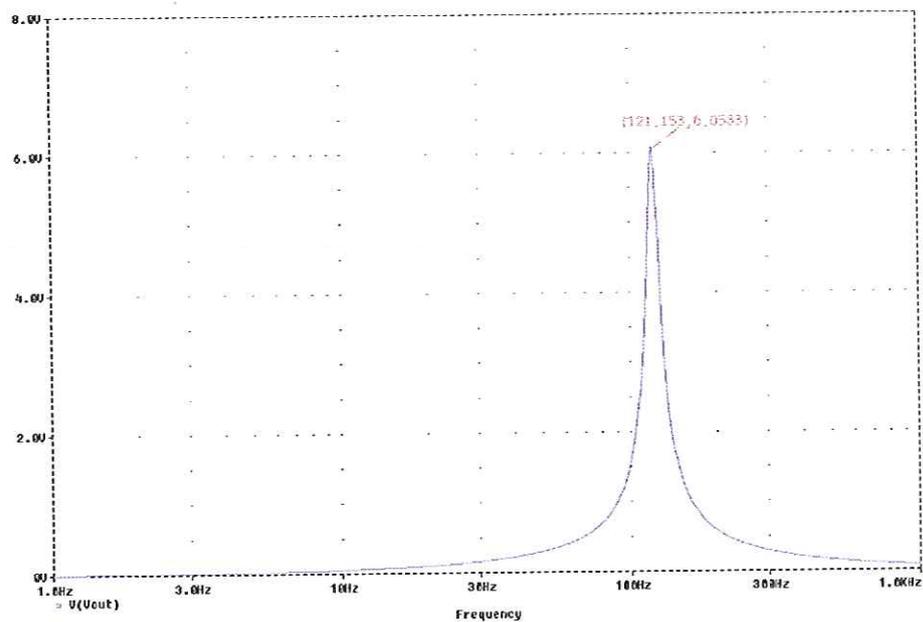


FIGURA 4.6 – CURVA DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DO FILTRO.

O amplificador montado, mostrado na Figura 4.7, tem o seu ganho definido com a variação do potenciômetro R₃. O ajuste do zero é realizado com a variação do potenciômetro R₈. Com estes ajustes, é possível obter uma curva de resposta que possua um ângulo de inclinação de 45° e que passe pela origem.

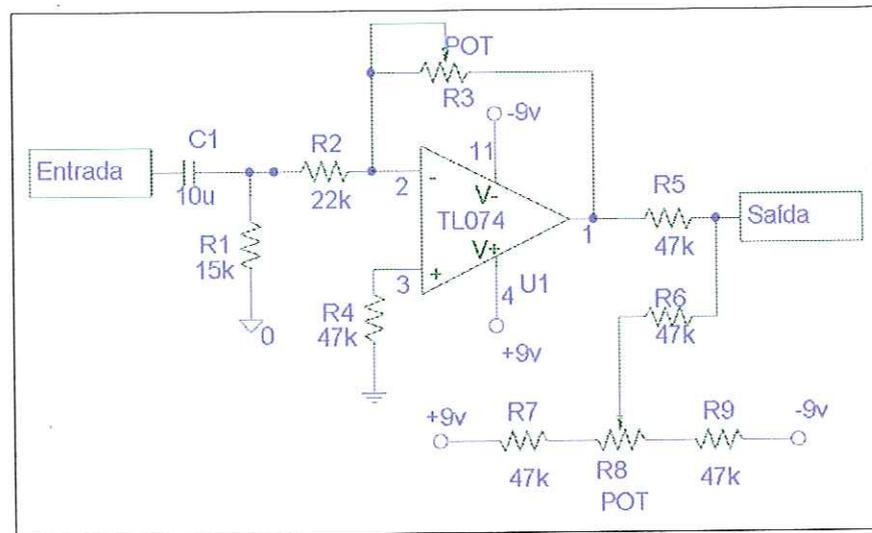


FIGURA 4.7 – CIRCUITO AMPLIFICADOR DE AJUSTE.

4.2.4 DESENVOLVIMENTO DO DETECTOR DE PICO

A correlação entre os valores de intensidade luminosa e a corrente primária será efetuada através de seus valores de pico após a amplificação. Este valor se mostrou muito eficiente em relação ao valor RMS, visto que a fibra pode distorcer o sinal, ocasionando erros de medida. Neste caso, a implementação de um detector de pico é essencial.

O detector de pico tem como princípio básico a carga de um capacitor, que possui uma resistência de fuga extremamente elevada. Quando é aplicada, em seus terminais, uma tensão senoidal, o capacitor é carregado com a tensão de pico e a mantém por longo tempo. Utilizando esta propriedade, monta-se um circuito elétrico com amplificadores operacionais como mostra a Figura 4.8.

Os diodos D_1 , D_2 , D_3 têm como função evitar a fuga de cargas do capacitor C_1 , pelo circuito de retorno. Já o amplificador operacional U_1 , por apresentar alta impedância de entrada, também evita o descarregamento do capacitor C_1 . O outro operacional U_2 opera como um isolador de circuitos, promovendo um correto casamento de impedâncias.

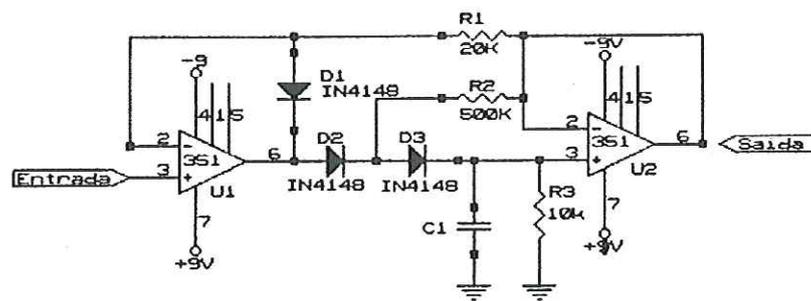


FIGURA 4.8 – ESQUEMA DO DETECTOR DE PICO

A linearidade deste circuito foi testada e o resultado apresentou-se satisfatório. O gráfico deste teste é mostrado na figura 4.9.

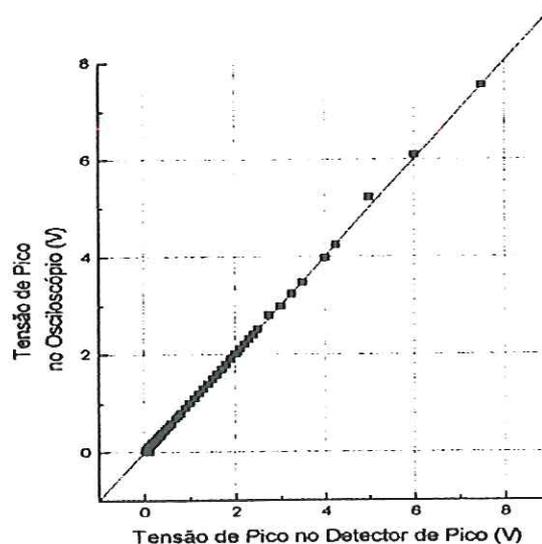


FIGURA 4.9 – Gráfico para verificação da linearidade do detector de pico

4.2.5 IMPLANTAÇÃO DO VOLTÍMETRO DIGITAL

O componente principal do voltímetro digital foi o circuito integrado ICL 7106 da Intersil. Tal componente é um conversor A/D que fornece uma saída de três e meio dígitos, diretamente para o “display”. Esse componente incorpora todos os elementos para fornecer uma saída digital a partir de uma entrada analógica, tais como decodificadores, “drivers”, etc. Em suma, esse componente tem uma série de aplicações, tais como voltímetros, ohmímetros, amperímetros, termômetros, etc.

É um componente de baixo custo e muito versátil, necessitando de poucos componentes externos para excitação dos “displays”.

As características principais do ICL 7106 são as seguintes:

- leitura do zero em todas as escalas;
- polarização real do zero para detecção de nulo;
- corrente de entrada de 1pA;
- excitação direta para os displays;
- baixo ruído;
- referência e clock incorporados;
- baixa potência de dissipação e de consumo;
- não necessidade de circuitos ativos externos.

4.2.6 ENSAIO E CALIBRAÇÃO UTILIZANDO LED

Como foi exposto no CAPÍTULO III, este trabalho apresenta um estudo da aplicação do LED como fonte óptica, bem como um estudo utilizando LÂMPADA INCANDESCENTE. Adotamos estas duas soluções, pois como foi comentado anteriormente, o LED apresenta-se como um componente que melhor responde à faixa de medição de corrente, porém apresenta alterações das medidas efetuadas

quando sujeito a variações de temperatura. Diferente da LÂMPADA INCANDESCENTE, que devido ao seu filamento ser resistivo não sofre nenhuma alteração com relação a variações de temperatura, porém apresenta um valor de leitura da corrente primária superior ao LED.

Como se observou anteriormente, a curva de resposta do LED apresenta um coeficiente negativo de temperatura. Assim, a solução natural é a introdução de um elemento que também possua um coeficiente negativo. Um elemento que possui essas características é o NTC (Negative Temperature Coefficient)

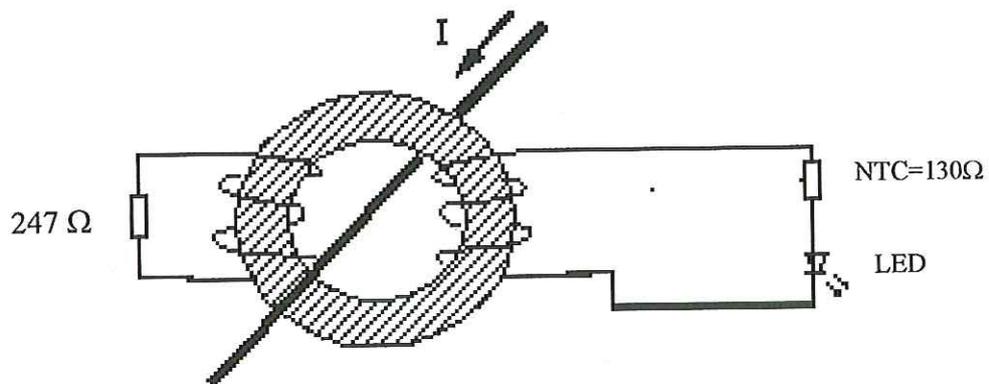


FIGURA 4.10 – CIRCUITO COMPENSADOR DE TEMPERATURA UTILIZANDO O NTC

Um NTC encontrado comercialmente é um de $130 \Omega @ 27^\circ\text{C}$. Este componente pode ser ligado em série com o LED para que ocorra uma compensação térmica. Como a taxa de variação do NTC é superior à do LED, um resistor deve ser ligado em paralelo com o primeiro de forma que as curvas de resposta em relação à temperatura sejam iguais.

A curva característica deste NTC é mostrada no gráfico da Figura 4.11.

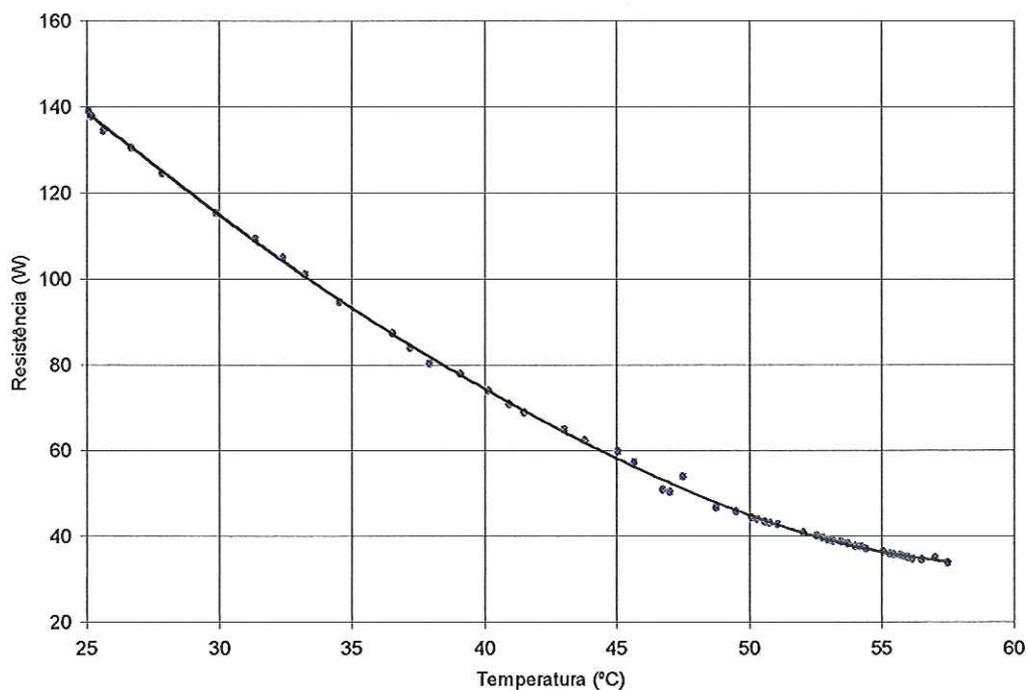


FIGURA 4.11 – GRÁFICO DA VARIAÇÃO DO NTC

O acoplamento em série do NTC de $130\Omega @ 27^\circ\text{C}$ com um LED verde sem a utilização do resistor de ajuste resultou no gráfico apresentado na Figura 4.12.

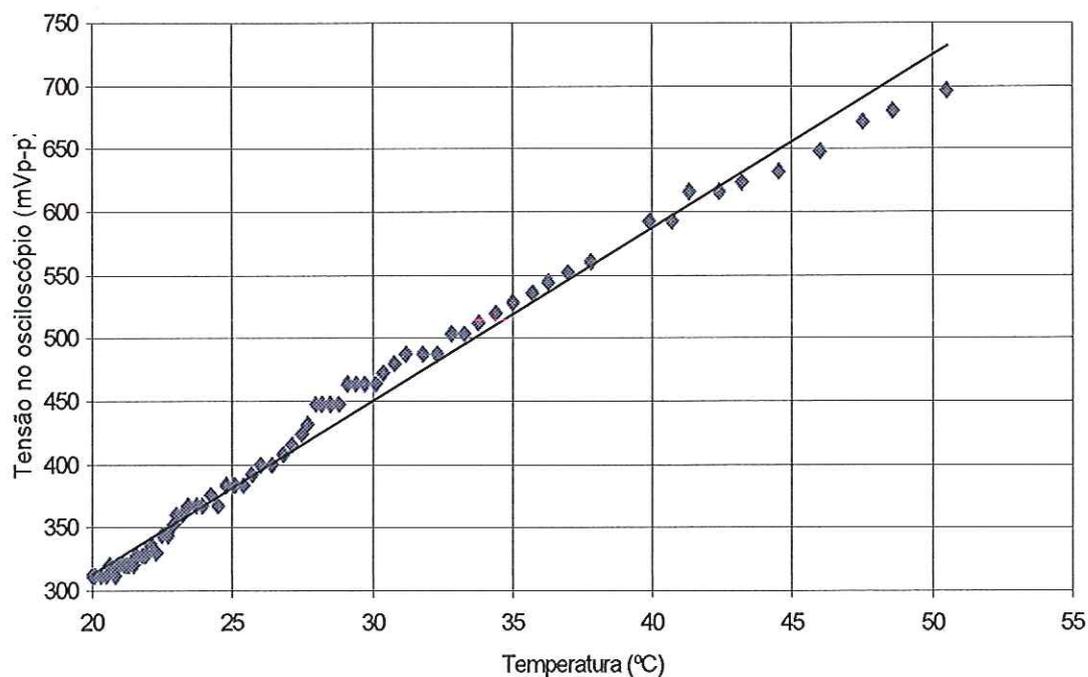


FIGURA 4.12 – Gráfico da compensação da temperatura com o NTC.

Neste gráfico, a curva obtida possui agora um coeficiente positivo de temperatura. Ajustando-se corretamente o valor do resistor ligado em paralelo com o NTC, pôde-se obter uma curva de resposta plana, isto é, o efeito da temperatura no circuito pode ser completamente eliminado.

Um outro fator que reduz o efeito da temperatura é a utilização de um LED com uma grande resposta espectral de luz. Para isso utilizou-se um LED comum de 5mm com a tonalidade entre o verde e o amarelo. Esta cor foi escolhida dentre outras por possuir um coeficiente de temperatura menor e por emitir muito mais luz do que as demais. A curva da dependência da temperatura deste LED é mostrada no gráfico da Figura 4.13.

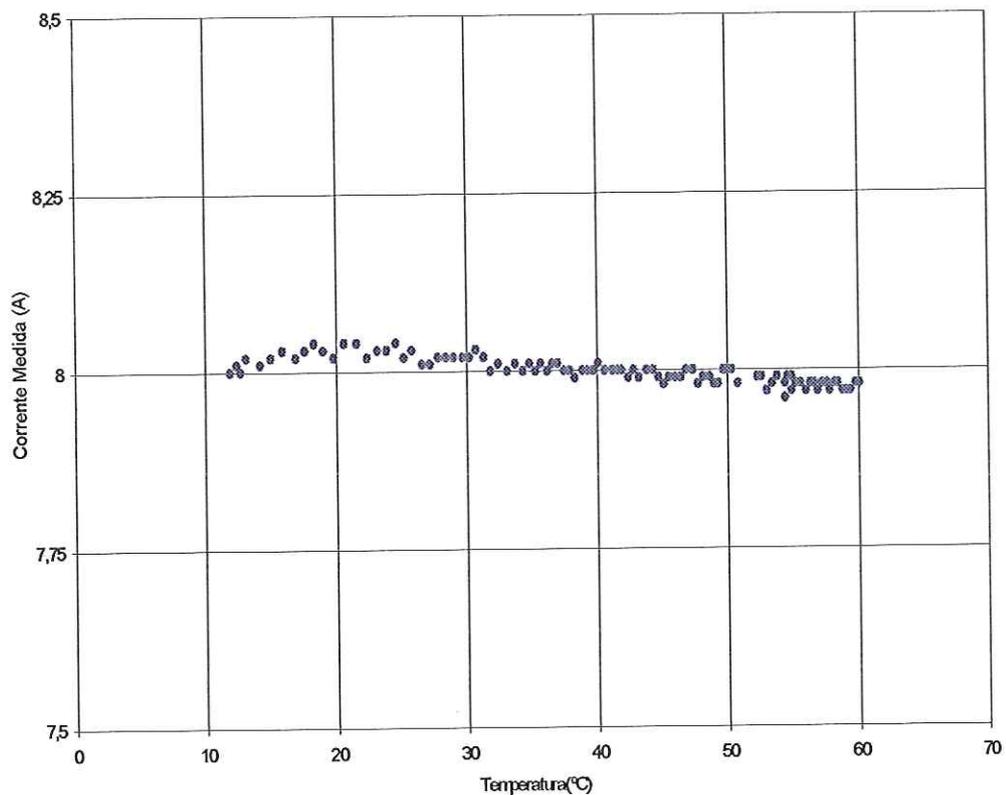


FIGURA 4.13 – GRÁFICO DA DEPENDÊNCIA DA TEMPERATURA DO LED UTILIZADO

Como visto anteriormente, o foto detector utilizado será o próprio LDR utilizado em montagens anteriores. Isto se deve à alta sensibilidade ao espectro de luz visível. Também, com o aumento da temperatura, a resposta espectral de luz do LED tende a aumentar, mas diminuindo a sua sensibilidade luminosa para cada espectro de luz.

Outra forma para eliminar a dependência da temperatura é a introdução de dois LED's ligados em série (Figura 4.14). Este tipo de montagem é mais simples de ser implementado e não necessita de ajustes posteriores de calibração. Como os coeficientes de temperatura são iguais, a mesma variação de um compensará a do outro. O gráfico da Figura 4.15 ilustra essa curva de resposta em relação à temperatura.

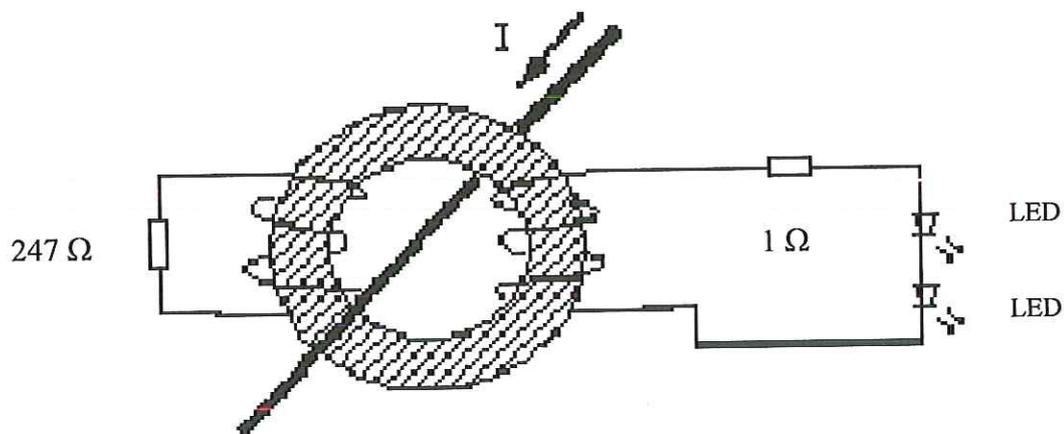


FIGURA 4.14 – CIRCUITO DE COMPENSAÇÃO COM LED



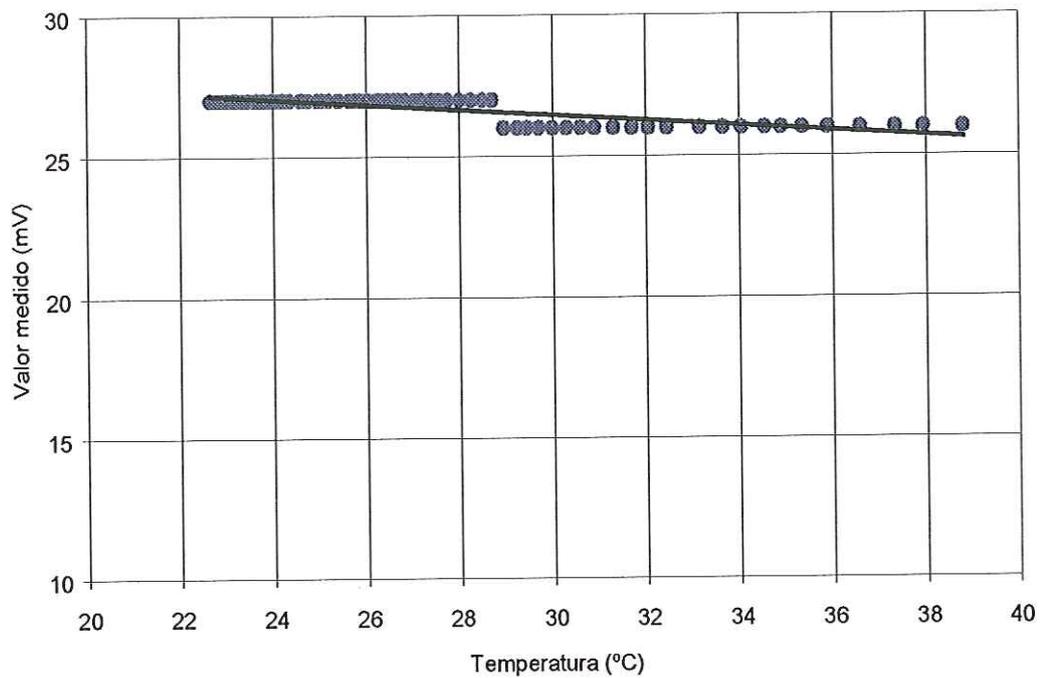


FIGURA 4.15 – GRÁFICO DA RESPOSTA EM RELAÇÃO À TEMPERATURA

Nota-se que o gráfico apresentado na Figura apresenta uma variação de tensão com relação à temperatura muito pequena se comparada com a curva do sistema sem a compensação.

O sistema montado gerou a seguinte curva de dependência da temperatura, conforme a Figura 4.16.

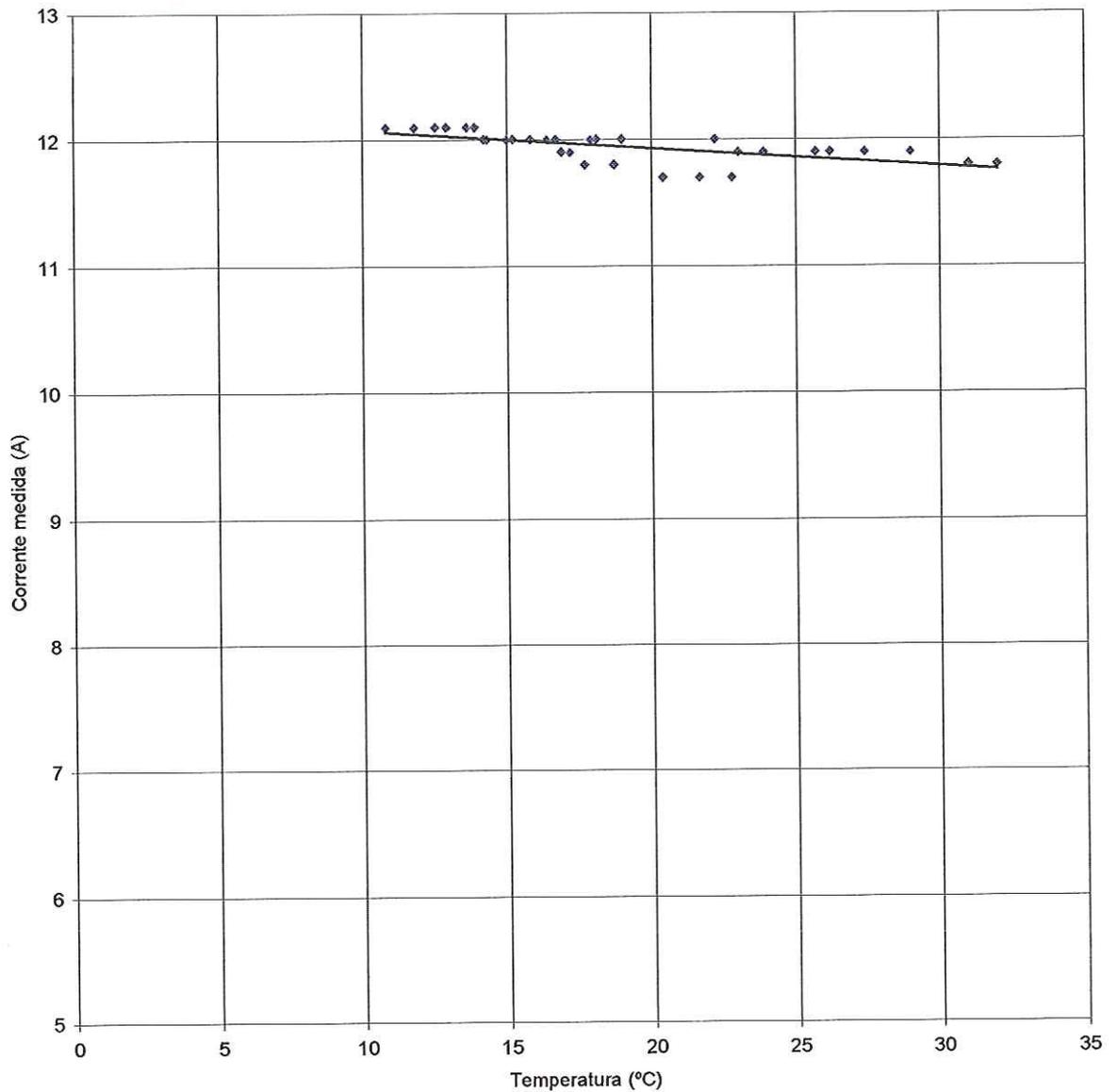


FIGURA 4.16 – GRÁFICO DA DEPENDÊNCIA DA TEMPERATURA PARA O PROTÓTIPO

Para aumentar-se a faixa de leitura do protótipo, implementou-se um circuito seletor de faixa de leitura. Assim, se a corrente exceder 20A, pode-se selecionar a outra faixa de leitura. Neste projeto, não haverá necessidade de atuação no sensor de corrente, eliminando qualquer contato com a linha de alta tensão. A seleção da faixa se dará apenas no receptor, localizado em uma região segura.

Todo o circuito, incluindo as adaptações e acessórios para a fixação da fibra, baterias e chaves, foi acondicionado em uma caixa de pequeno volume e anexado à vara de manobra.

4.3. CALIBRAÇÃO DO PROTÓTIPO

Com todo o sistema montado, o protótipo foi calibrado. Para isso, o resistor variável ligado à bobina secundária do TC foi ajustado para que as correntes superiores a 4A e inferiores a 20 fossem lidas sem distorções ou saturados. A curva de resposta obtida é mostrada na Figura 4.17.

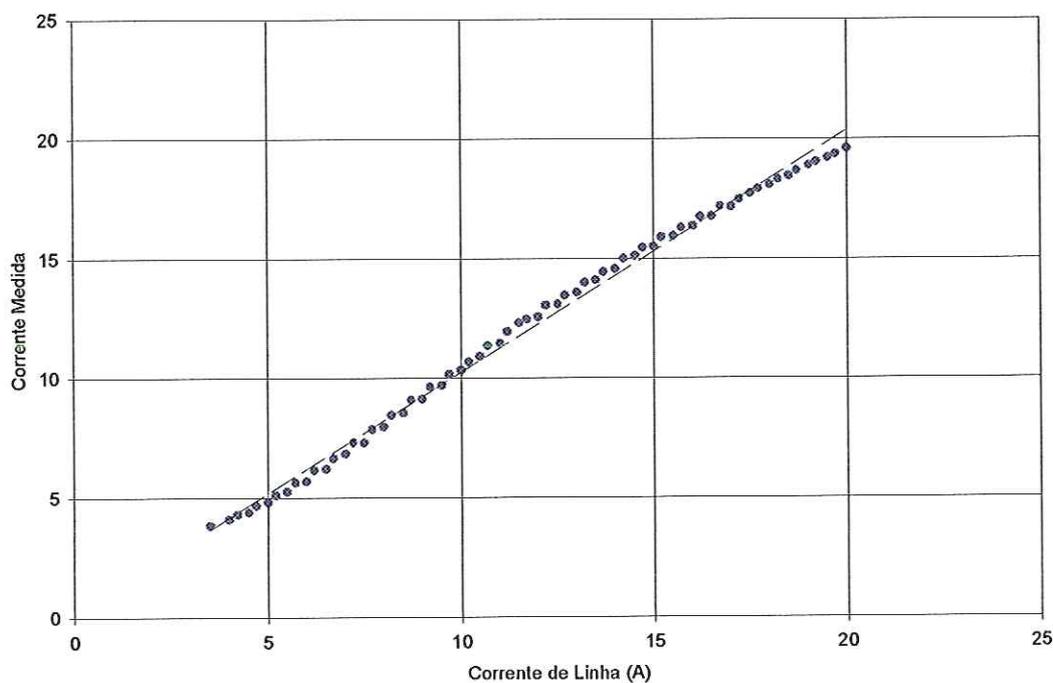


FIGURA 4.17 – CURVA DE RESPOSTA DO PROTÓTIPO PARA A ESCALA 1

A utilização do circuito seletor de faixa possibilitou-nos medir correntes de 20 a 40A, conforme está ilustrado na Figura 4.18. Assim sendo o protótipo pode efetuar medidas de correntes na faixa de 4 a 40 A.

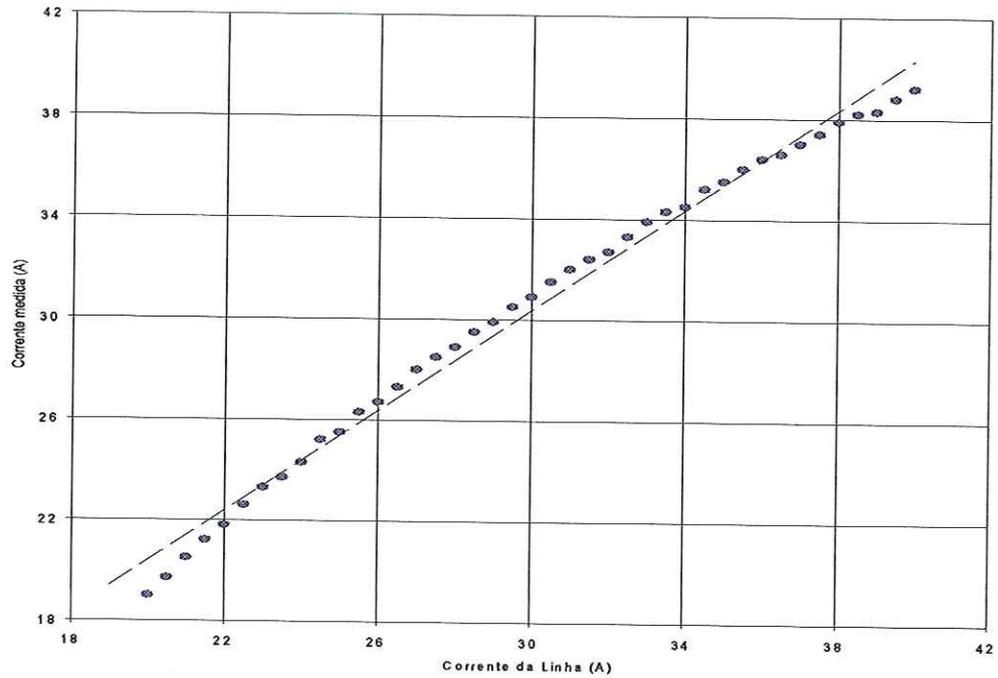


FIGURA 4.18 – CURVA DE RESPOSTA DO PROTÓTIPO PARA A ESCALA 2

Com estas duas curvas, montou-se o gráfico geral, ilustrado na Figura 4.19.

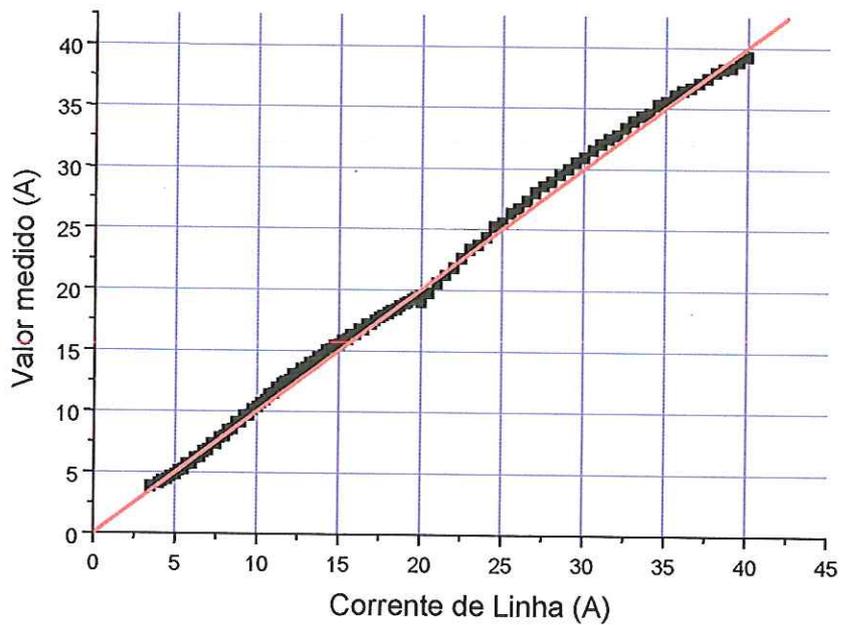


FIGURA 4.19 – CURVA DE CALIBRAÇÃO DO PROTÓTIPO

Nota-se pelo gráfico da Figura 4.19 pela equação desta curva dada pela regressão linear, que o comportamento deste circuito é o esperado. Pequenos erros estão presentes devido à não linearidade do LED que não foi totalmente eliminada.

4.3.1 ENSAIO E CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE CORRENTE COM LÂMPADA

INCANDESCENTE

De acordo com o que foi proposto no CAPÍTULO III, estudar-se-á a seguir o comportamento do dispositivo de medição eletro-óptico utilizando uma LÂMPADA INCANDESCENTE.

Primeiramente foram levantados alguns pontos para a aferição do novo equipamento, conforme mostra a curva da Figura 4.20.

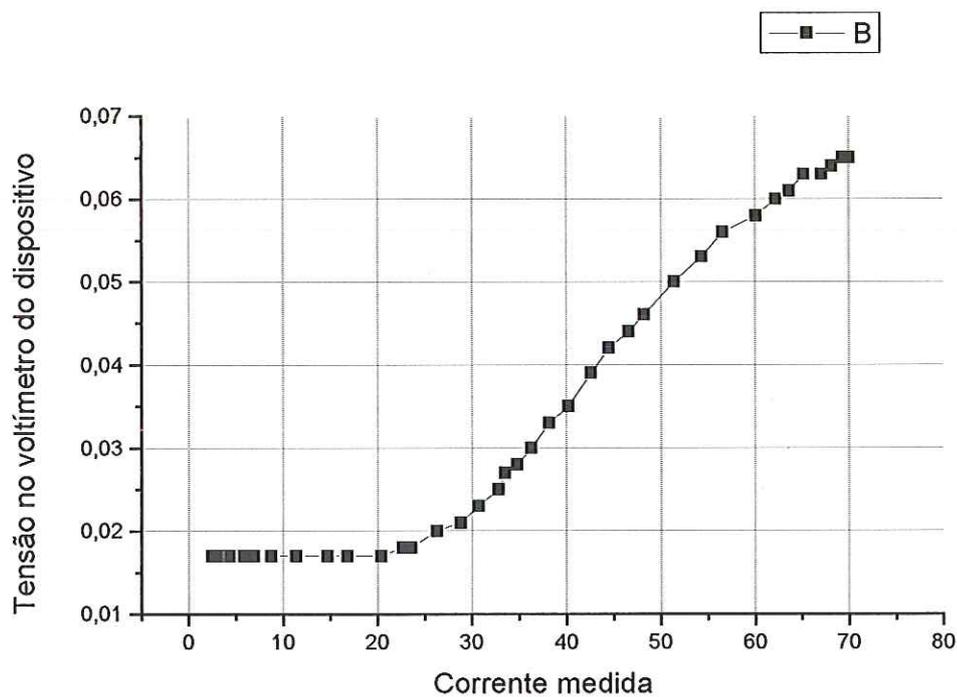


FIGURA 4.20 – CURVA DE RESPOSTA DO MEDIDOR DE CORRENTE

Nota-se que a leitura no voltímetro somente varia a partir de uma corrente de 20 A. Isto se deve ao fato de que há necessidade de uma energia mínima para que o filamento da lâmpada se aqueça para a produção de luz. Outro fato importante é a existência de uma saturação para correntes elevadas.

Foi realizado um novo ensaio para verificar a tensão adequada à lâmpada e a calibração do voltímetro. Para tanto, substituiu-se a garra de medição por um VARIAC e TRANSFORMADOR, conforme ilustra a Figura 4.21. O resultado é apresentado no gráfico da curva ilustrada na Figura 4.22.

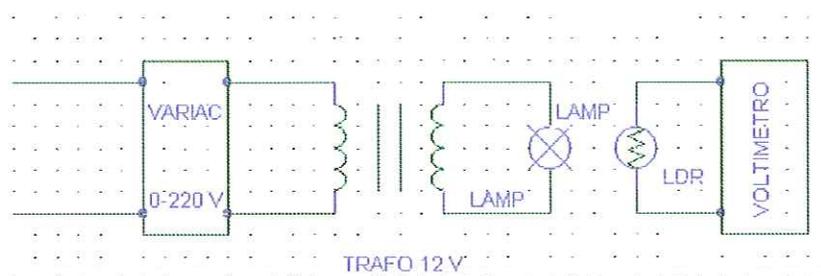


FIGURA 4.21 - ENSAIO REALIZADO COM A LÂMPADA X VOLTÍMETRO

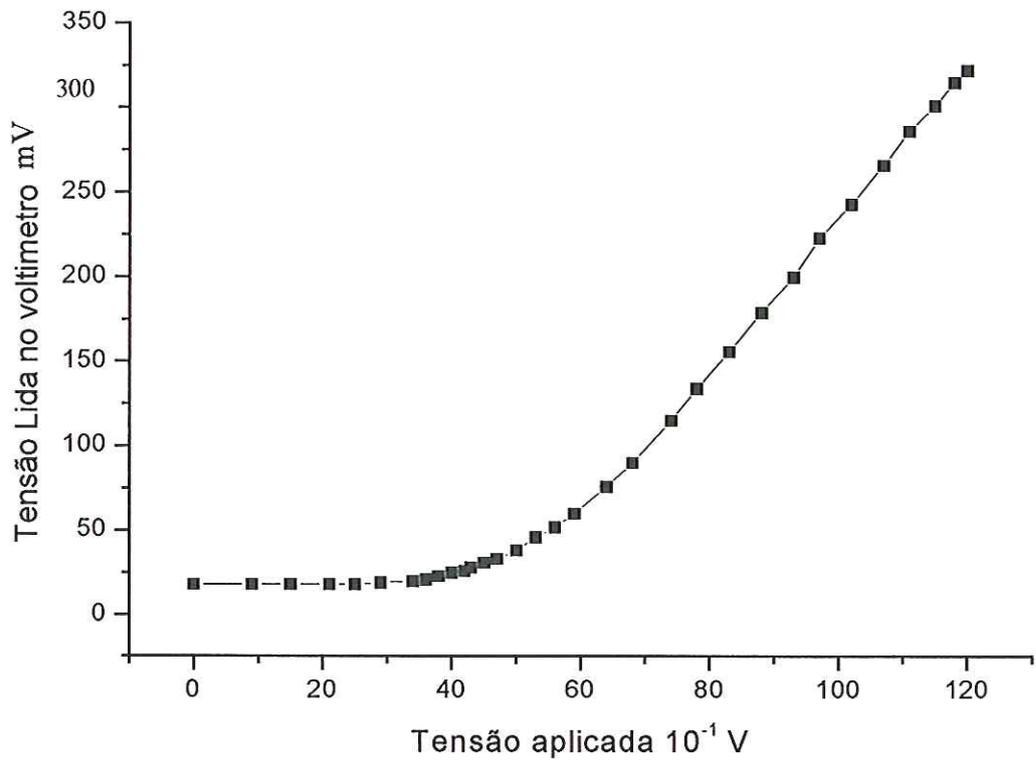


FIGURA 4.22 - CURVA RELATIVA AO ENSAIO DA LÂMPADA

Como pode-se observar, este gráfico apresenta um comportamento linear, devendo tão somente proceder-se os ajustes para deslocar a reta afim de ter uma simetria entre os valores de tensão gerado x lido.

Após calibrar-se o voltímetro, foi feito um novo ensaio com a lâmpada acoplada na garra. O resultado está ilustrado na Figura 4.23

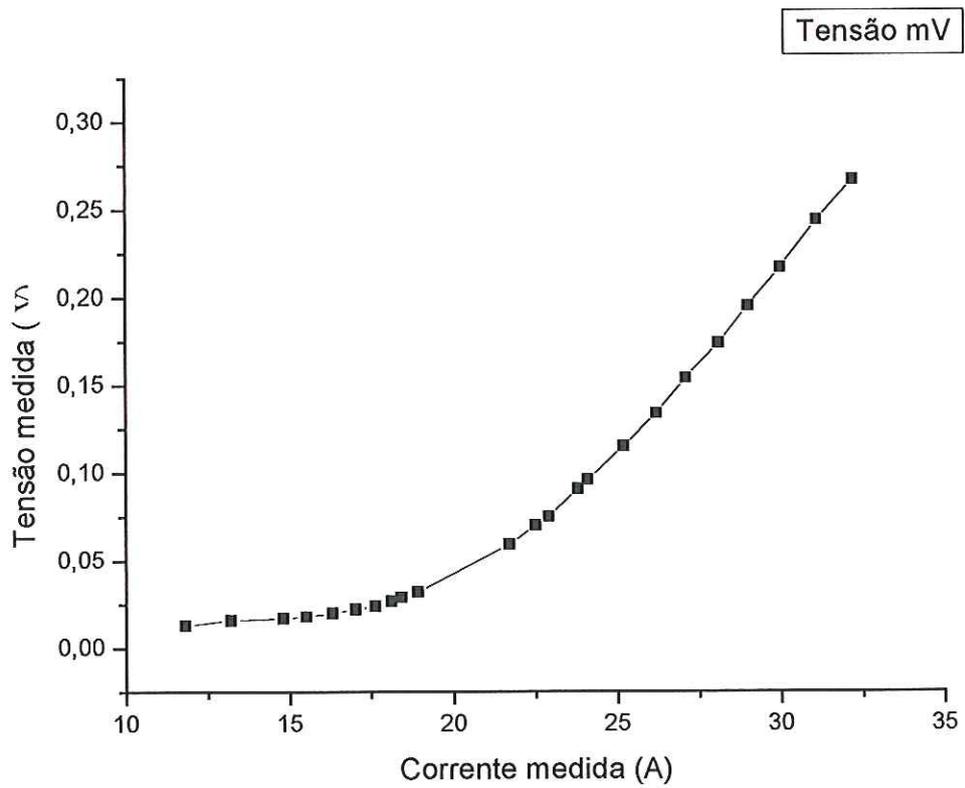
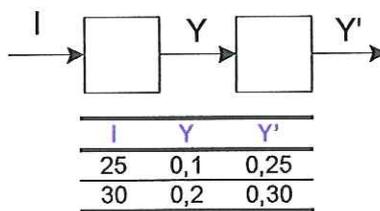


FIGURA 4.23 - CURVA DE CALIBRAÇÃO DA LÂMPADA

O passo seguinte foi o levantamento da equação e cálculo de um circuito que possibilitasse o deslocamento necessário da reta.



$$Y' = AY + B \tag{4.5}$$

$$0,25 = A0,1 + B \tag{4.6}$$

$$0,30 = A0,2 + B \tag{4.7}$$

Multiplicando a equação 4.6 por (-2) e somando à equação 4.7, tem-se $B = 0,20$.

Substituindo na equação 4.7, tem-se:

$$0,30 = A0,20 + 0,20 \quad (4.7)$$

onde $A = \frac{1}{2}$

Portanto a equação que permitirá o ajuste da linearidade da reta será:

$$Y' = \left(-\frac{1}{2}\right)Y + (-0,20) \quad (4.8)$$

Para atender a equação acima, montou-se o circuito da Figura 4.24.

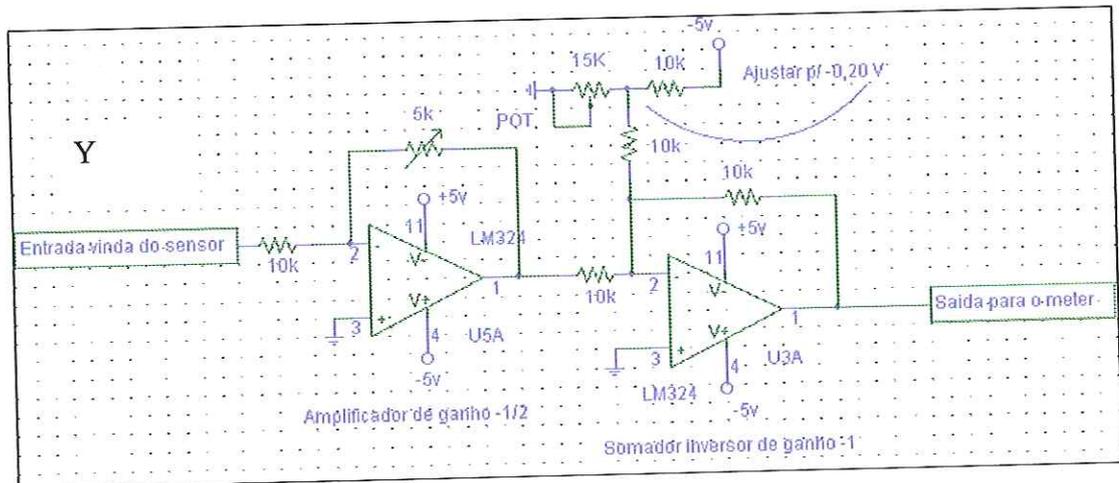


FIGURA 4.24 - CIRCUITO OBTIDO A PARTIR DA EQUAÇÃO 4.8.

Este circuito funcionou com sucesso, como pode ser visto na curva levantada na Figura 4.25; apenas serão feitas algumas aferições devido ao “off-set” dos operacionais.

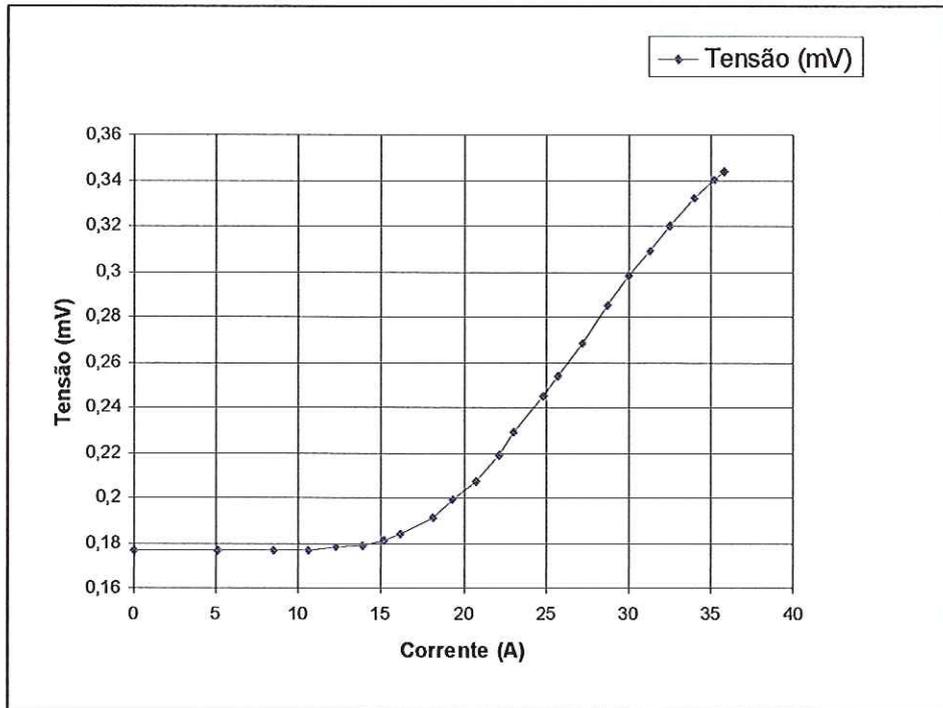


FIGURA 4.25 - LEVANTAMENTO DA CURVA COM O CIRCUITO DE CORREÇÃO

Portanto, depois de ajustarmos o circuito, a curva levantada foi a seguinte,

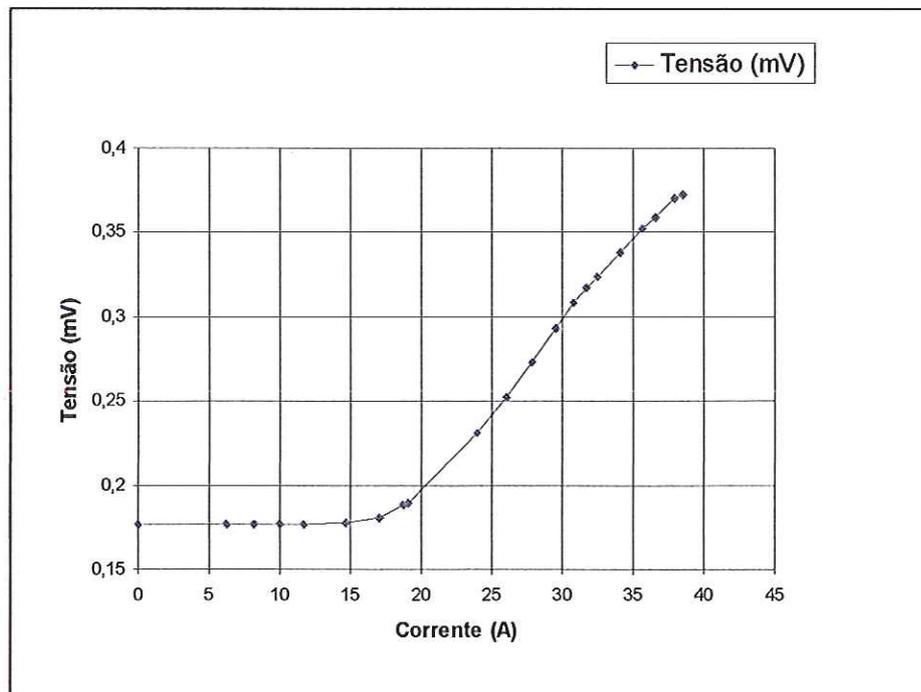


FIGURA 4.26 - CURVA LEVANTADA APÓS AJUSTES

De acordo com a Figura 4.26, observa-se um deslocamento desta curva com relação à levantada (Figura 4.23) antes do circuito de ajuste. Também pode-se observar que mesmo com o ajuste linear desta curva, somente haverá uma modificação na leitura do voltímetro a partir do valor de 15 A na corrente primária. Este fato já foi abordado no CAPÍTULO III, e representa uma condição insatisfatória quando comparada à aplicação do LED.

Pode-se aumentar a faixa de medição deste dispositivo, como foi feito com o sistema de LED, inserindo lâmpadas em série. Assim procedendo, para aumentar-se a escala de medição para uma faixa até 60 A, insere-se uma lâmpada cuja resistência seja similar ao original (29 Ω), sendo que somente uma delas é acoplada à fibra óptica. A característica levantada é mostrada na Figura 4.27.

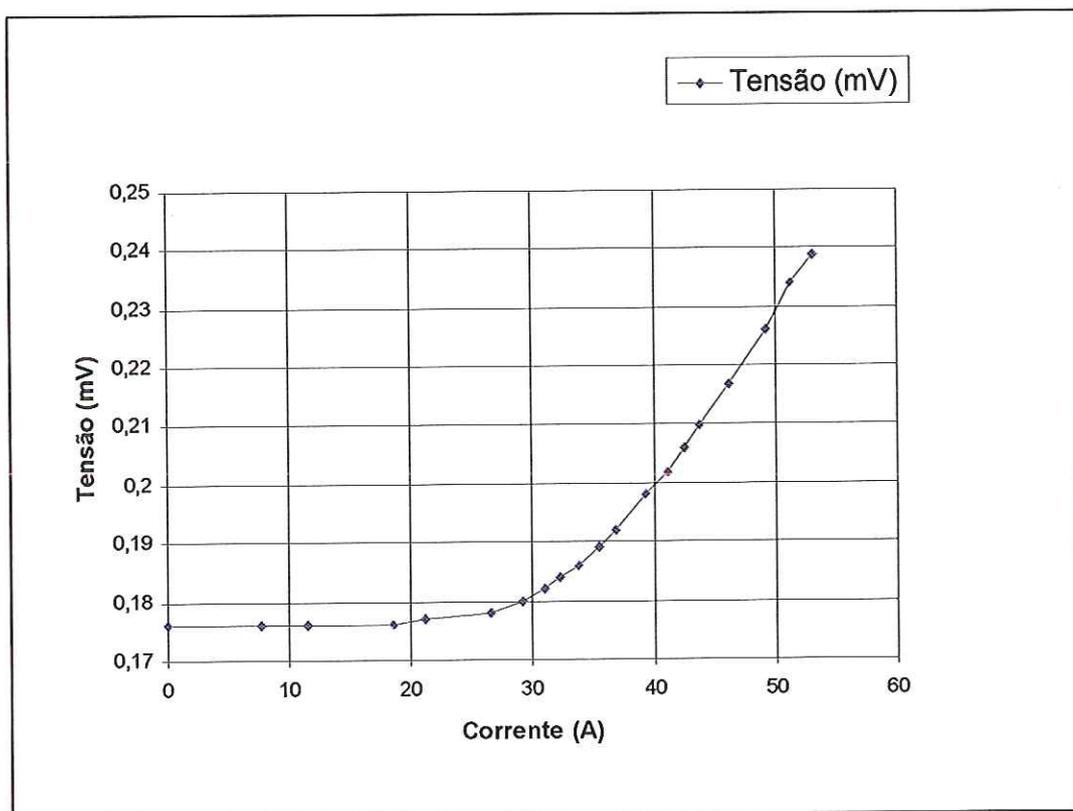


FIGURA 4.27 - CURVA LEVANTADA DA ASSOCIAÇÃO DE 2 LÂMPADAS EM SÉRIE

4.3.2 CONFEÇÃO DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO

O circuito completo do projeto e o “layout” da placa são mostrados a seguir através das Figuras 4.28 e 4.29

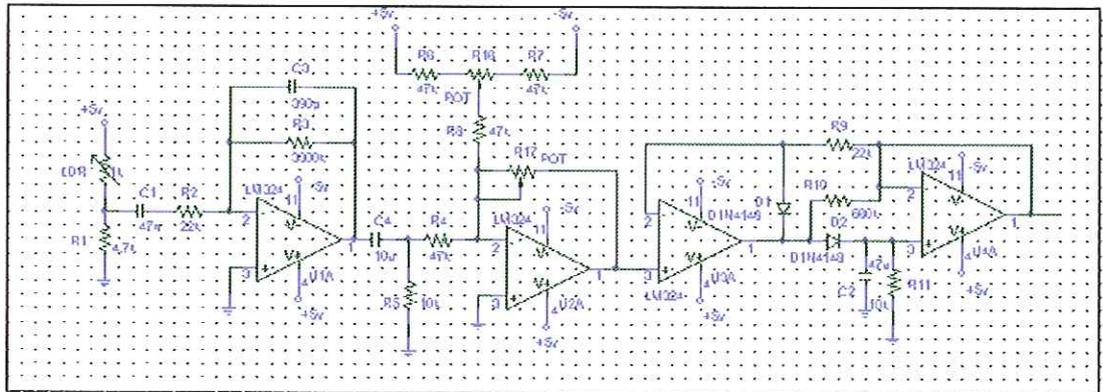


FIGURA 4.28 - PROTÓTIPO DO CIRCUITO DE MEDIÇÃO ELETRO-ÓPTICO

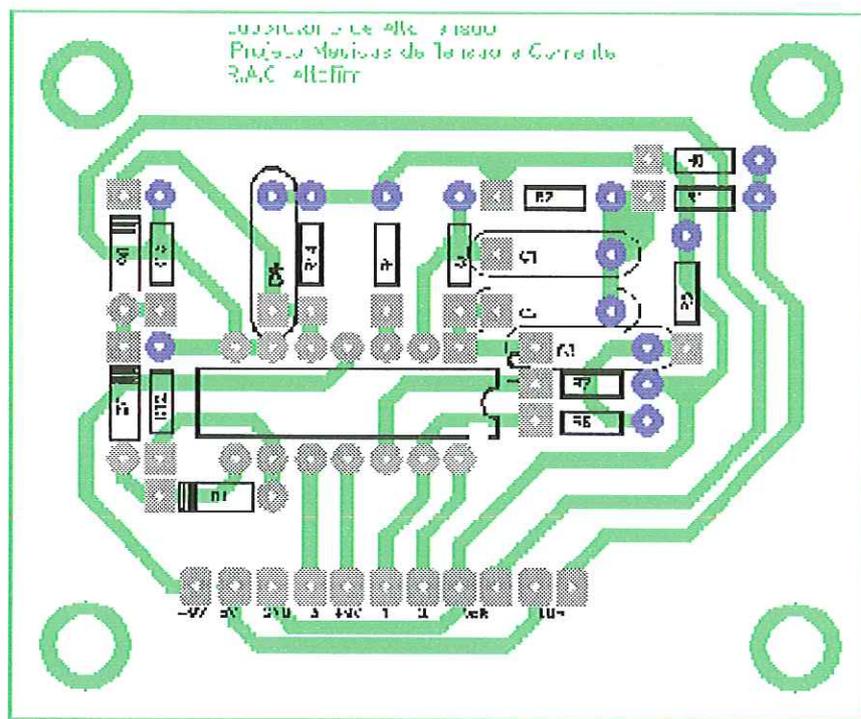


FIGURA 4.29 PLACA DO CIRCUITO DE MEDIÇÃO ELETRO-ÓPTICA

4.3.3 TESTE DA FIBRA

Este teste teve como objetivo averiguar a transmissão de sinais através da fibra óptica. Para isso foi injetado no transmissor uma onda senoidal e feita a comparação do sinal de entrada com o sinal de saída.

4.3.4 TESTE DE ISOLAÇÃO

Devido ao fato do trabalho ser realizado em linhas de distribuição de energia, classe 15 kV, realizou-se o teste de isolação do equipamento. Para tanto, montou-se o experimento mostrado na Figura 4.30.

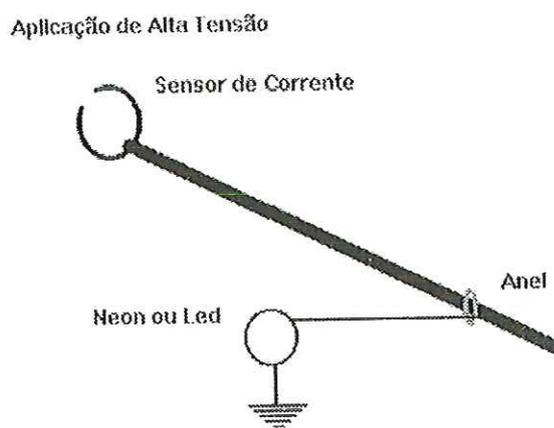


FIGURA 4.30 – VERIFICAÇÃO DA ISOLAÇÃO DO DISPOSITIVO

Na parte superior da barra foi aplicado inicialmente 18 kV e na parte inferior adaptou-se uma fita metálica envolta à barra. Entre essa fita e o terra, ligou-se um neon. Assim, se na parte inferior existisse uma tensão maior que 70 volts, o neon iria acender. Este experimento comprovou a isolação deste equipamento para 18 kV.

Capítulo 5 - Sistema de aquisição de dados

Neste capítulo será descrito o programa computacional utilizado para a aquisição dos dados medidos em campo pelo dispositivo de medição de corrente eletro-óptico.

5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Como vimos nos capítulos anteriores, todo o sistema de medição de corrente envolve medidas analógicas, o que torna bastante difícil de ser processado em relatórios de análises ou até mesmo para armazenar tais informações. Procurando sanar este problema, neste trabalho desenvolveu-se um sistema, cujo diagrama de blocos encontra-se na Figura 5.1.

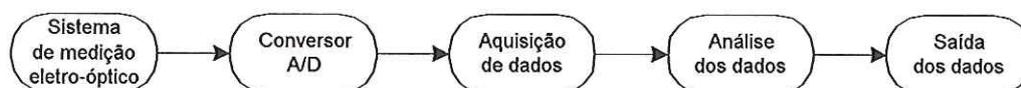


FIGURA 5.1 – DIAGRAMA FUNCIONAL DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Como pode ser observado neste diagrama os sinais analógicos provenientes do sensor de corrente para serem processados em microcomputadores necessitam ser digitalizados em interfaces do tipo A/D e a saída do sinal após sua conversão estará presente na porta paralela do computador. Através de um software dedicado, desenvolvido exclusivamente para este projeto em linguagem Delphi, será feita a aquisição destes sinais digitalizados e então será desenhada uma curva da corrente medida X tempo. A seguir fa-se-á uma descrição de cada etapa do processo de aquisição e análise dos dados.

5.2. DESCRIÇÃO GERAL DO PROGRAMA COMPUTACIONAL

5.2.1 DESENVOLVIMENTO DA INTERFACE ANALÓGICO/DIGITAL

O sinal analógico proveniente das medidas de corrente efetuadas no campo são convertidos para sinais digitais, apropriados para análise em microcomputador, através de um conversor A/D modelo ICL 7135 de 4½ dígitos. O sinal de entrada de 0,00 a 2,00V, compatível com os valores medidos no sistema eletro-óptico, é comparado e convertido em sinal de 4 bits na saída do conversor. O sistema possui uma fonte de alimentação simétrica $\pm 5V$, fornecidas por regulador de tensão 7805 e 7905. O sistema trabalha com clock de 120kHz, onde é utilizado um CI 4093, composto por 4 portas NAND. Esta frequência é mais comum de ser utilizada pois faz a rejeição da frequência de 60Hz, e sua taxa de aquisição é de 3 leituras por segundo.

O conversor A/D ICL 7135 trabalha com uma tensão de referência de 1,00V, necessária para sua aferição.

5.2.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

A aquisição de dados inicia quando um determinado nível analógico presente à entrada do conversor A/D é convertido em um sinal digital que é enviado a uma porta paralela. Esta saída digital é formada por 5 bits de endereço (E_0, E_1, E_2, E_3, E_4) e 4 bits de dados que formam 1 (um) “nibble” (D_0, D_1, D_2, D_3). O diagrama esquemático do sistema de aquisição de dados é mostrado na Figura 5.2.

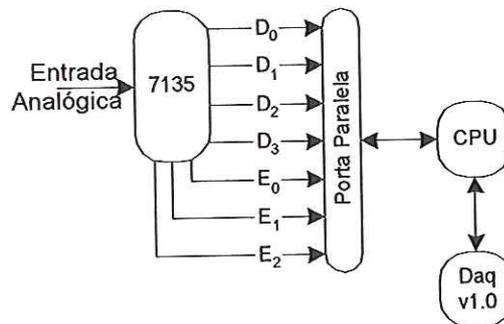


FIGURA 5.2 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Como se observa pelo diagrama acima, à medida que se tem um sinal digital na saída, a transferência é executada obedecendo uma sequência lógica ou seja, primeiramente faz-se o endereçamento pelos bits E_x (qual “display” será visualizado) logo após há a transferência dos dados pelos bits D_x . Este ciclo se repete em uma frequência de 120kHz, com taxa de aquisição de 3 vezes por segundo.

Para melhor entendermos esta transferência de dados, apresentamos a seguir a Figura 5.3, onde através de um componente discreto (“display”) e de um decodificador de 7 segmentos é simulado a aquisição do dado de uma leitura.

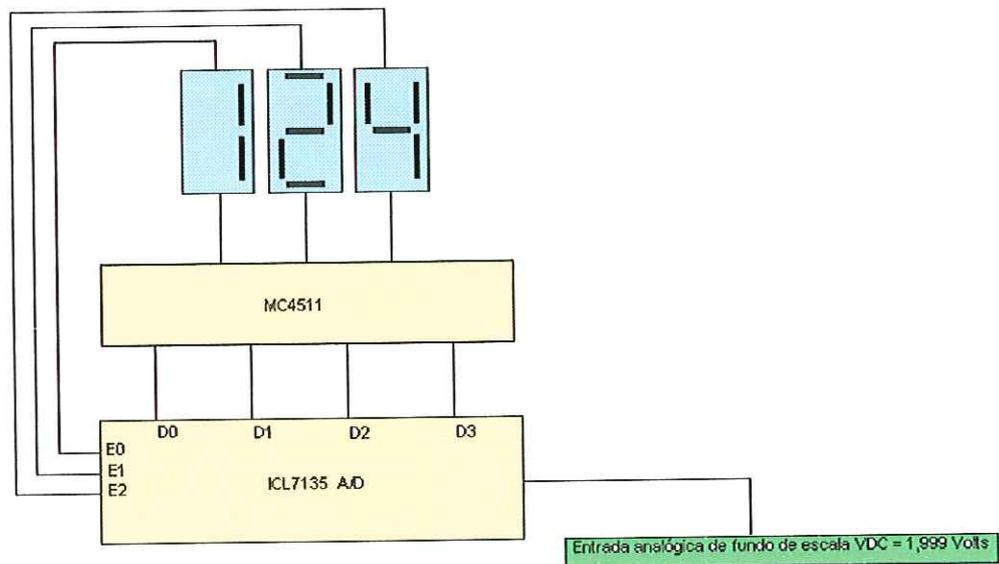


FIGURA 5.3 – DIAGRAMA REPRESENTATIVO DA TRANSFERÊNCIA DE DADOS

O que se procura mostrar com a Figura 5.3 é a lógica do sistema de aquisição com componentes eletrônicos, porém o interesse do trabalho é apresentar um software que execute este função. Assim sendo foi desenvolvido o sistema DAq v 1.0.

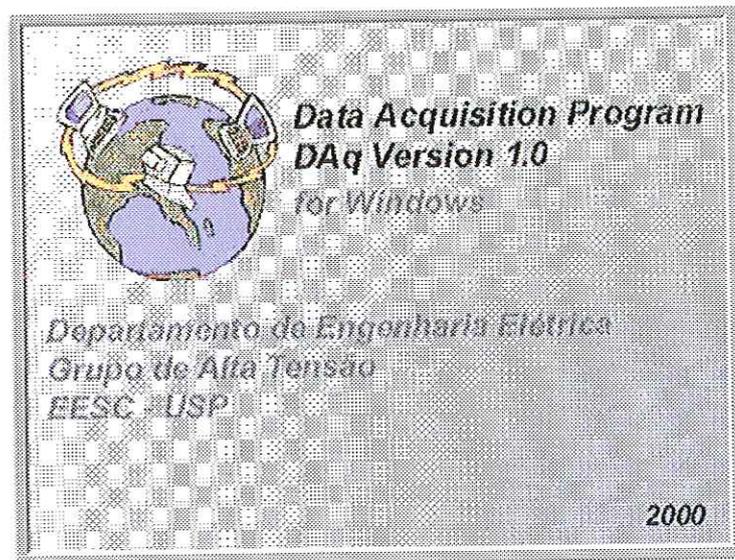


FIGURA 5.4 – TELA DE APRESENTAÇÃO DO DAQ V 1.0.

O DAq v 1.0 é um aplicativo em linguagem Delphi o que facilita sua interface gráfica e foi desenvolvido para ser executado sobre o sistema operacional MS Windows 98, sendo compatível também com o MS Windows 95.

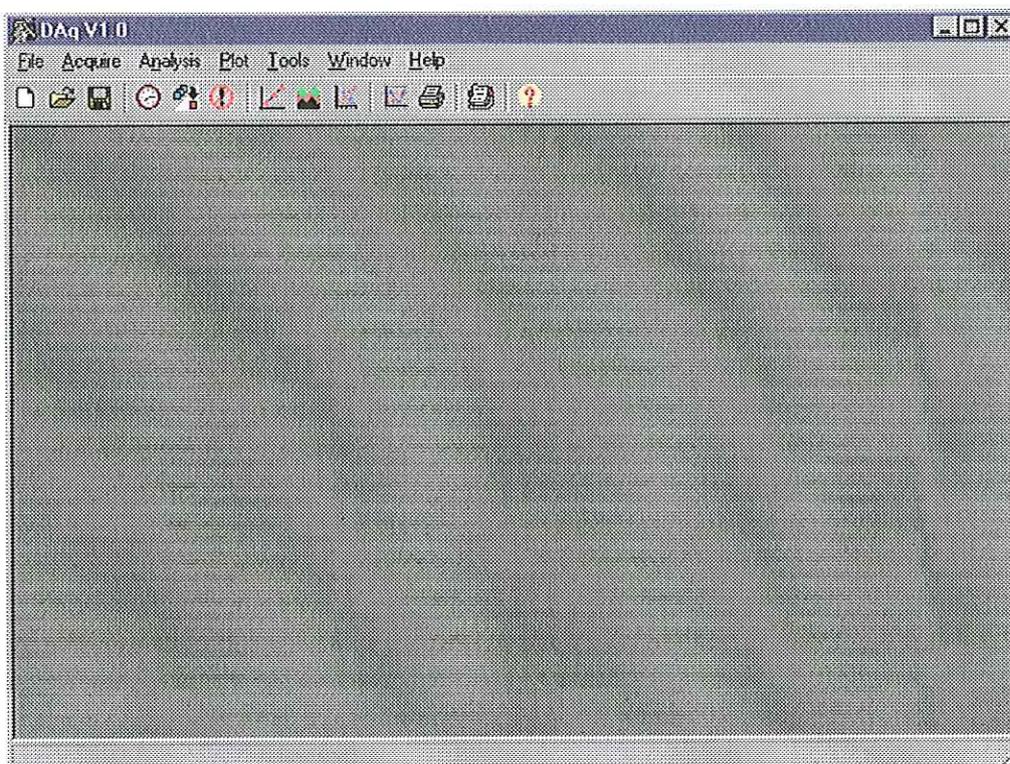


FIGURA 5.5 – TELA PRINCIPAL DO SOFTWARE DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Ele é carregado automaticamente quando o computador que roda um destes dois sistemas operacionais é ligado. Ao ser iniciado, o DAq abre uma janela contendo vários elementos estruturais, seguindo o padrão Windows, como está ilustrado na Figura 5.5.

Este programa possui uma interface MDI (“Multiple Document Interface”), o que possibilita trabalhar com vários documentos abertos como alguns aplicativos atuais (Word, Excel). A seguir são descritos os principais elementos estruturais desta janela, denominada área de trabalho.

Barra de Título



Tem por finalidade mostrar o nome do aplicativo – Daq, além de permitir a operação de mover a janela na tela, pela ação de clicar e arrastar o mouse sobre ela. Duplo clique sobre a **Barra de Título** restaura ou maximiza a janela, dependendo do seu estado.

Barra de Menu



A Barra de Menu guarda nos seus menus e submenus todos os comandos disponíveis do aplicativo. Sendo um menu de contexto, adequa-se sempre ao elemento/ambiente selecionado, mostrando os comandos possíveis e inibindo ou substituindo aqueles que não puderem ser executados no momento.

Barra de Ferramentas Padrão



A barra de ferramentas **Padrão** segue o padrão dos aplicativos Microsoft, disponibilizando os comandos de arquivo, de salvamento e alguns comandos dedicados à função do software.

A seguir serão detalhados as principais telas necessárias ao gerenciamento dos dados levantados, bem como os comandos para emissão de relatórios e plotagem de gráficos.

Comando de Arquivo

Nesta tela pode-se abrir os bancos de dados já existentes, referentes às medidas de corrente realizadas em modo manual, ou seja, um levantamento específico de dados de corrente para uma determinada condição pré-estabelecida. A importação destes dados pode ser feita em formato ASCII ou através de arquivos de outros aplicativos (Excel, Access). Pode-se também ter a opção de abrir um novo banco de dados e tabular os valores lidos de um determinado experimento onde a priori se quer analisar o comportamento de um sistema. A Figura 5.6 mostra esta tela.

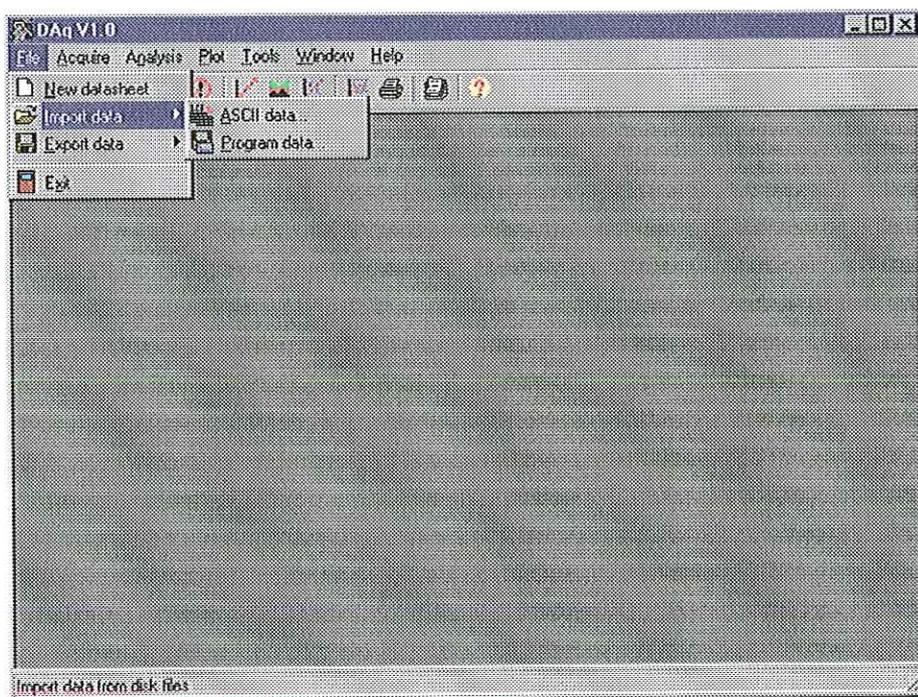


FIGURA 5.6 – TELA DE IMPORTAÇÃO DE BANCO DE DADOS

Comando de Aquisição de dados

A outra opção que se tem para aquisição das medidas de corrente efetuadas no campo é em tempo real. Como foi descrito anteriormente os dados presentes na porta paralela do computador são lidos pelo software através de uma varredura destas

medidas e são disponibilizados para leitura através de duas opções: leitura instantânea em um display ou tabulação dos dados com a visualização instantânea da curva de corrente x tempo. As Figuras 5.7, 5.8, 5.9 nos mostram estas opções.

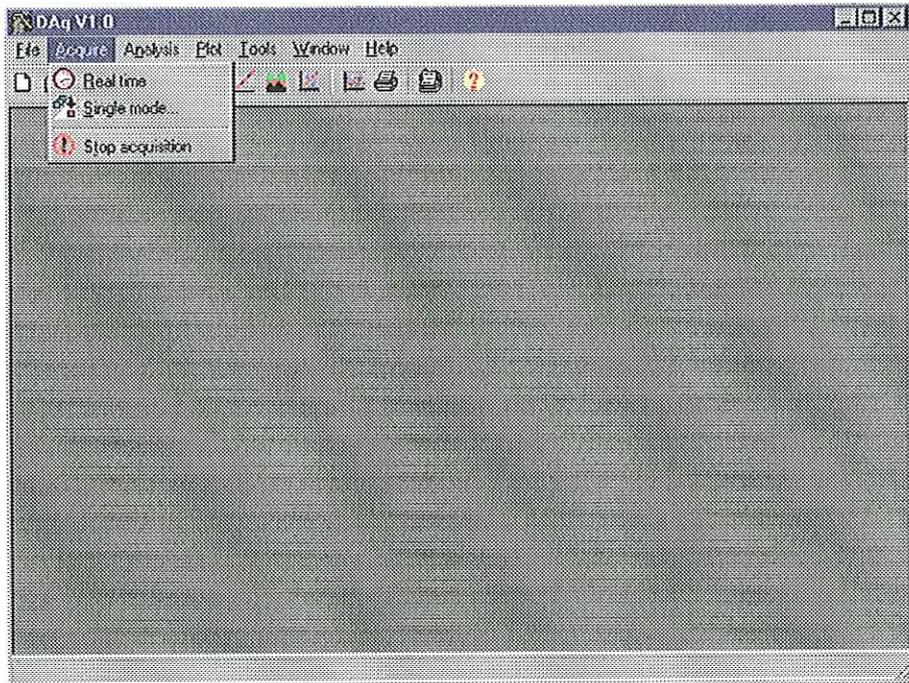


FIGURA 5.7 – OPÇÃO DE LEITURA DA CORRENTE EM TEMPO REAL

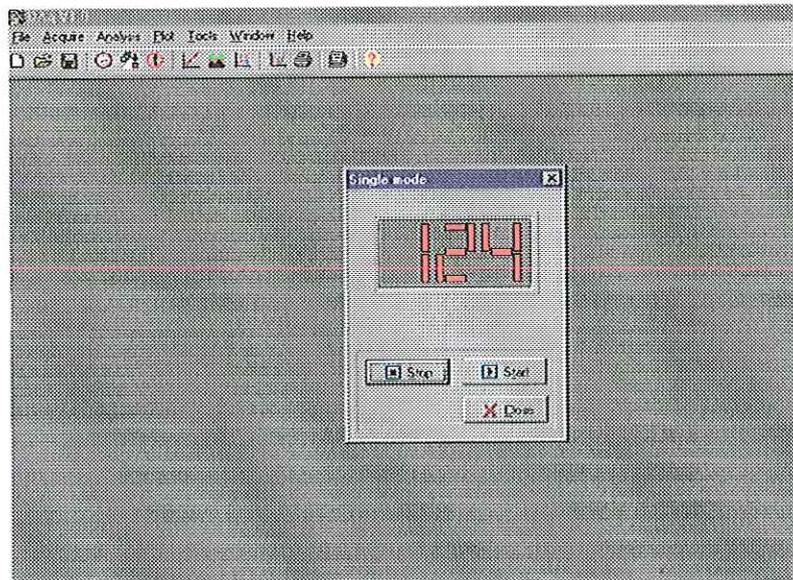


FIGURA 5.8 – TELA DE LEITURA INSTANTÂNEA DOS VALORES MEDIDOS

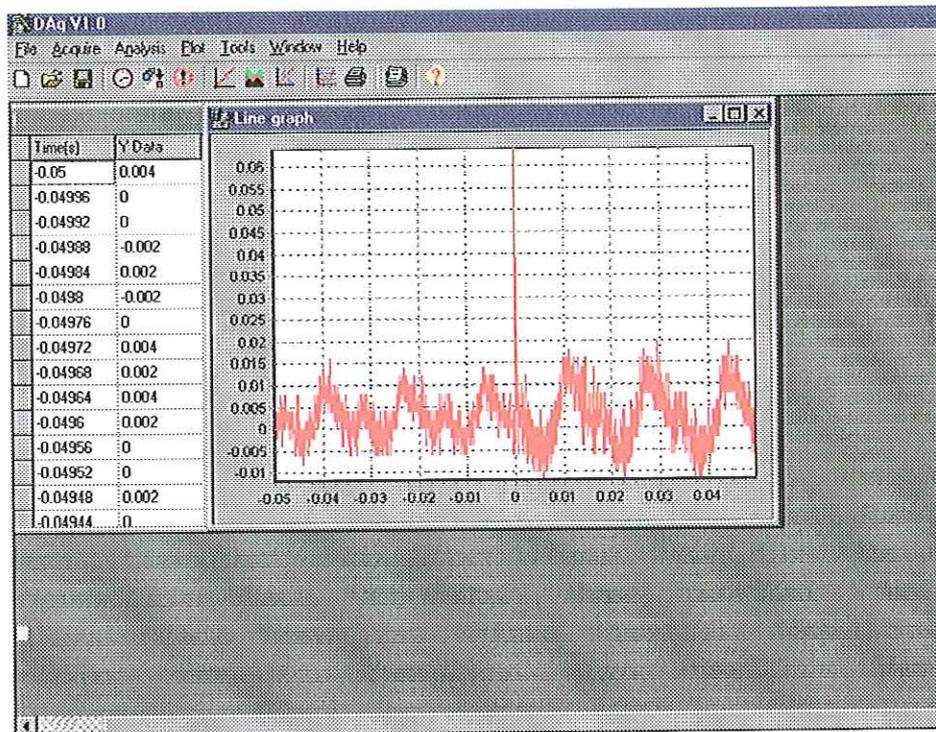


FIGURA 5.9 – TELA DE TEMPO REAL DAS MEDIDAS DE CORRENTE

5.2.3 SISTEMA DE ANÁLISE DE DADOS

Após o levantamento dos dados, que pode ser feito através de um banco pré-existente ou em tempo real, conforme foi descrito anteriormente, o software Daq permite analisar os resultados e processar alguns cálculos, como por exemplo: Interpolação Polinomial pelo método de Lagrange, Valor em RMS, Cálculo do período da função.

Através do levantamento experimental dos dados de corrente medida x tensão de saída do sistema eletro-óptico montou-se uma curva padrão conforme descrito no CAPÍTULO IV. Estes dados, por serem discretos, necessitam ser interpolados a fim de que possa ser elaborada uma curva padrão de medida da corrente. Esta curva padrão estará armazenada em uma biblioteca e será a referência para outras medidas de corrente, ou seja, ao ser lido um novo valor de tensão do sistema eletro-óptico, este

valor é interpolado na curva padrão gerando assim um valor correspondente de corrente. Esta leitura de corrente é mostrada tanto no display como na curva de tempo real.

O software Daq nos permite fazer cálculo do valor RMS, o período da onda, cálculo da integral, valor DC da curva de corrente obtida.

Estes resultados podem ser impressos em relatório, conforme será visto na próxima seção.

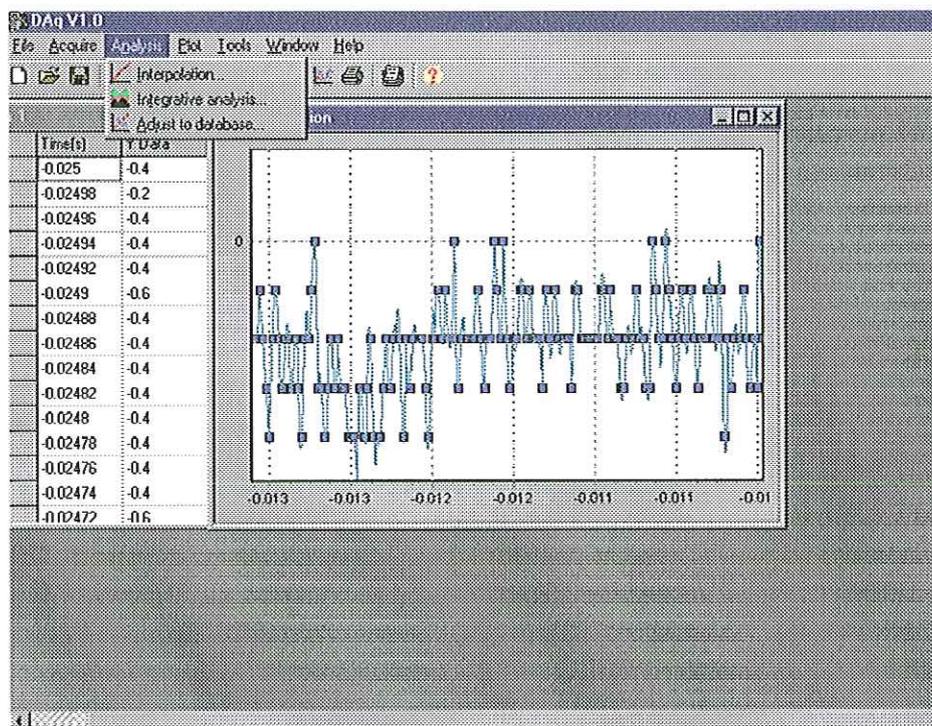


FIGURA 5.10 – TELA DE COMANDO ANÁLISE DOS VALORES DE CORRENTE OBTIDOS

Como se observa na Figura 5.10 os dados levantados como pontos discretos podem ser interpolados e assim gera-se uma nova curva, bem como pode-se processar os cálculos anteriormente descritos.

5.2.4 SISTEMA DE SAÍDA DE DADOS

O software Daq possui comandos de saída de dados através de “export” para arquivos, através de uma “plot” de uma determinada curva ou como já foi descrito, na emissão de relatórios. As Figuras 5.11, 5.12 e 5.13 ilustram essas opções.

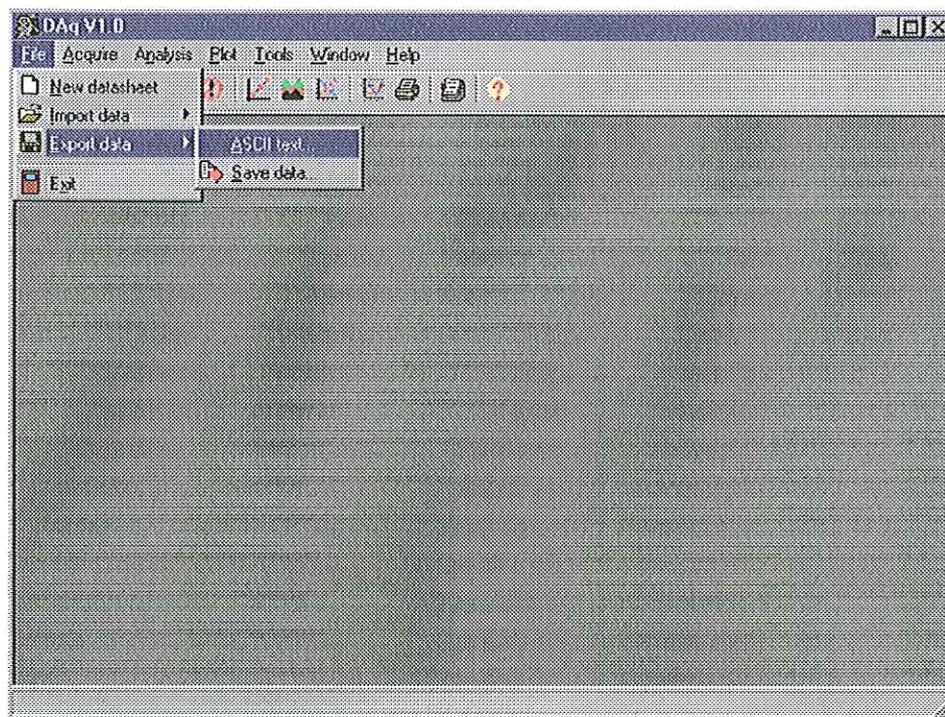


FIGURA 5.11 – TELA DE COMANDO PARA SAÍDA DE DADOS PARA ARQUIVO

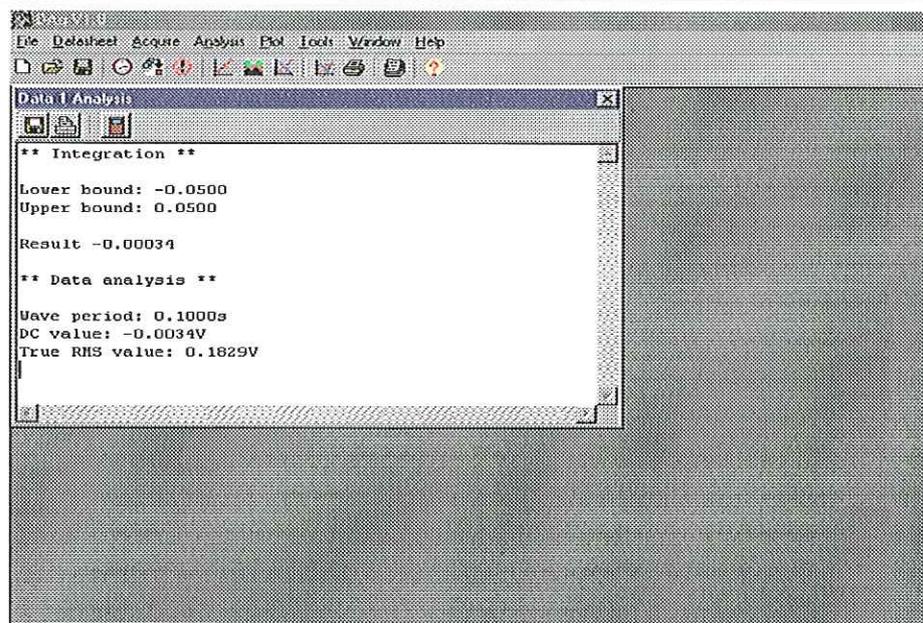


FIGURA 5.12 – TELA DE COMANDO PARA IMPRESSÃO DA CURVA LEVANTADA .

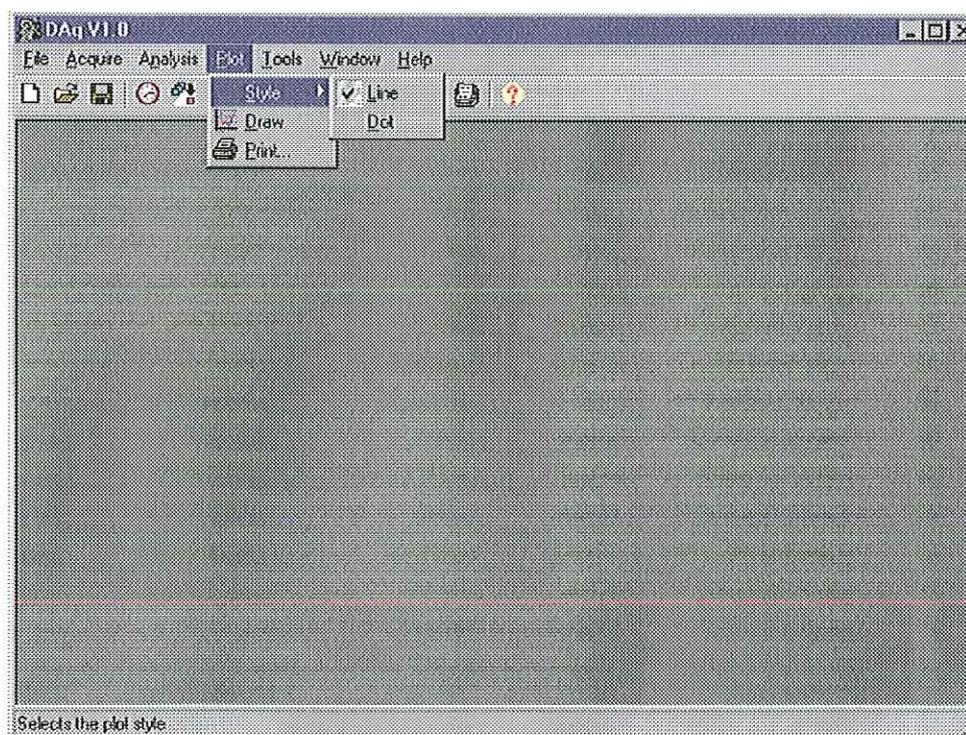


FIGURA 5.13 – TELA DE COMANDO PARA IMPRESSÃO DE RELATÓRIO

Portanto este software Daq proporciona recursos para a aquisição e gerenciamento dos dados levantados através de um sistema eletro-óptico o que proporciona bastante agilidade no tratamento destas informações. Bem como da

precisão que o sistema pode alcançar uma vez que através de técnicas estatísticas e softwares dedicados pode-se melhorar o erro do nosso sistema. Esta melhoria no processo de medição pode ser tema de uma dissertação futura além do desenvolvimento de maiores ferramentas de cálculo.

Capítulo 6 - Conclusão

Neste trabalho procurou-se mostrar a viabilidade do uso de um sensor eletro-óptico para medição de correntes na classe de 15 kV. Para tanto, o sistema foi ensaiado em laboratório para uma condição de sistema monofásico. Contudo, isto não impede que ele seja facilmente adaptado para um sistema trifásico.

Neste trabalho procuramos dar continuidade ao trabalho de dissertação de mestrado de Marcos Rodrigues Costa [10] utilizando-se do desenvolvimento de um protótipo e executando ensaios em laboratório. A dissertação anteriormente citada nos proporcionou conceitos teóricos que nos baseamos para o desenvolvimento desta dissertação.

O sensor óptico, que fica diretamente em contato com a parte de alta tensão, é totalmente passivo e dispensa qualquer tipo de fonte de alimentação. Isto facilita a manutenção do sistema, que não necessita ter, a todo instante, sua parte de alta tensão retirada da linha, mas apenas inspeções e coletas de dados em sua parte de baixa tensão, normalmente situada em locais de fácil acesso.

Foi verificado também o comportamento do sensor quanto à temperatura ambiente e constatou-se que o circuito emissor de luz (LED) apresentava variações quando da mudança brusca de temperatura. Este fato nos levou à busca de outras soluções, onde foi optado pela troca deste componente por uma lâmpada incandescente e também circuitos passivos para a correção térmica.

As duas correções mostraram-se viáveis. O uso da lâmpada incandescente apresentou a limitação da faixa de leitura da corrente, indo de valores de 20A a 100A.

A correção térmica mostrou-se mais promissora tanto por sua linearidade quanto pela faixa de leitura de 5A a 100A.

Foi também desenvolvido um sistema I/O de baixo custo para permitir a manipulação dos dados digitalmente. Ele acoplado a um programa dedicado permite monitorar as correntes em tempo real e também emitir relatórios para análise futura.

Para a leitura das medidas que foram ensaiadas no laboratório utilizamos 01 amperímetro alicate fundo de escala de 100 A para comparação das medidas geradas de corrente primária e 01 multímetro fundo de escala de 200 mV para aferição das medidas efetuadas em tensão DC no módulo eletrônico. Tanto o amperímetro alicate como o multímetro possuem display 4 ½ dígitos a LCD.

Assim sendo temos os erros previstos no sistema tanto para utilização do LED como para Lâmpada incandescente baseado nas leituras dos instrumentos:

Amperímetro alicate: Faixa 100 A – Precisão de +/- 2,5% + 10D

Multímetro: Faixa 200mV – Precisão de +/- 0,05% + 3D

Referências bibliográficas

- [1]. COPEL-Companhia Paranaense de Energia; “Operação de Linhas e Redes”, N.027.
- [2]. ROGERS, A.J.; (1977). Optical methods for measurement of voltage and current on power systems. *Optics and Laser Technology*, pp. 273-282, December.
- [3]. SMITH A.M. (1978). Polarization and magneto optic properties of single-mode optical fiber. *Applied Optics*, v.17, n.1, pp. 52-56, January.
- [4]. ULRICH, R.; RASHLEIGH, S.C. and EICKHOFF, W.; (1980). Bending-induced birefringence in single-mode fibers. *Optics Letters*, v.5, n.6, pp. 273-275, June.
- [5]. PAPP, A. and HARMS, H.; (1980). Magneto optical current transformer. *Applied Optics*, v.19, n.22, pp. 3729-3745, November.
- [6]. LAMING, R. I. and PAYNE, D.N.; (1989). Electric current sensors employing spun highly birefringent optical fibers. *Journal of Lightwave Technology*, v.7, n.12, pp. 2084-2094, December.
- [7]. GIOZZA, F.W.; CONFORTI; WALDMAN, H. (1991). *FIBRAS ÓPTICAS – tecnologia e projetos de sistemas*. Makron Books/McGraw-Hill.
- [8]. HEBNER, R. E.; MALEWSKI, R. and CASSIDY, E.C. (1977). Optical methods of electrical measurement at high voltage levels. *Proceedings of the IEEE*, v.65, n.11, pp. 273-282, November.
- [9]. EDWARDS, H. O.; KEDRGEJEWSKI, K.P.; LAMING, R. I. and PAYNE, D. (1989). Optimal design of optical fibers for electric current measurement. *Appl. Opt.*, v.28, n.11, pp. 1977-1979, June.
- [10]. COSTA, M.R.; (1996). *Medidas de tensões e correntes – classe 15 kV – por sistemas eletro-ópticos e magneto-ópticos*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- [11]. VIEIRA, A.J.C. (1992). *Construção e caracterização de um sensor de altas correntes utilizando fibra óptica*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

- [12]. MILLMAN, J. and HALKIAS, C.C.; (1981). *ELETRONICA - dispositivos e circuitos*. McGraw-Hill do Brasil.
- [13]. WATSON, J. Photodetectores and electronics.
- [14]. HANRIOT, J.M.; GUILLOUX, C. (1986). Digital acquisition and numerical processing of measuring signals, in a high voltage circuit breaker testing laboratory. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. PWRD-1, n.3, pp. 134-139, July.
- [15]. HAYT, W.H.Jr (1983) Eletromagnetismo. Livros técnicos e científicos. Editora S.^a.
- [16]. MELLO, F.P. (1983). Proteção de Sistemas Elétrico de Potência. Santa Maria-RS.
- [17]. DEETER, M.N.; ROSE, A.H.; DAY, G.W.; and SAMUELSON, S.; (1991). Sensitivity limits to ferromagnetic Faraday effect magnetic field sensors. *J. Appl Phys.*, v.70, n.10, pp. 6407-6409, November.
- [18]. DEETER, M.N.; ROSE, A.H. and DAY, G.W.; (1990). Fast, sensitive magnetic-field sensors based on the Faraday effect in YIG. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, v.8, n.12, pp. 1838-1842, December.
- [19]. DEETER, M.N.; DAY, G.W.; (1993). Magneto-optic magnetic field sensors based on uniaxial iron garnet films in optical waveguide geometry. *IEEE Transactions on Magnetics*, v.29, n.6, pp. 3402-3404, November.
- [20]. TANG, D.; ROSE, H.A.; DAY, G.W. and ETZEL, S.M.; (1991). Annealing of linear birefringence in single-mode fiber coils: Application to optical fiber current sensors. *Journal of Lightwave Technology*, v.9, n.8, pp. 1031-1037, August.

- [21]. HEBNER, R.E. and MISAKIAN, M.; (1979). Temperature dependence of the electro-optic Kerr coefficient of nitrobenzene. *J. Appl. Phys.*, v.50, n.9, pp. 6016-6017, September.
- [22]. CIPELLI, A.M.V.; (1982). *Teoria e desenvolvimento de projetos de circuitos eletrônicos*. Érica.