

GUO LUEN CHANG

TRANSDUTOR PIEZELÉTRICO ÓPTICO

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Física do Setor de Ciências Exatas da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre.

CURITIBA
1989



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS EXATAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

ATA DA DEFESA DE TESE DE MESTRADO DO SR. GUO LUEN CHANG

Título da Tese: "TRANSDUTOR PIEZELÉTRICO ÓPTICO"

Em sessão pública de defesa de tese, iniciada às 10:00 horas, nesta data, após um seminário sobre o assunto da tese e arguição pela banca, esta decidiu atribuir Conceito B.

Curitiba, 28 de novembro de 1989.

Banca Examinadora:

Prof. RENÉ ROBERT
Presidente - UFPR

Prof. HIPOLITO JOSÉ KALINOWSKI
UFF

Prof. MÁXIMO SIU LI
IFQSC/USP

FIGHA CATALOGRÁFICA

621.381528
C456t

CHANG, Guo Luen.
Transdutor piezelétrico
óptico. Curitiba, UFPR, 1989.
p.37.

Dissertação de Mestrado
para obtenção do grau de
Mestre em Física.

1. Transdutor. 2. Pieze-
letricidade.

Ao meu pai Joo Piao Chang (in memoriam),
à minha mãe Kuan Chen Chang,
à minha esposa Meel Jain Chang,
aos meus filhos Dahge, Yenlin e Welly.

AGRADECIMENTOS

À Companhia Paranaense de Energia - COPEL, principalmente à Diretoria de Operação, pela oportunidade e apoio para a realização deste curso.

Ao professor Dr. René Robert, pela orientação sempre segura e dedicada que me proporcionou.

Aos Professores Dr. César Cusatis e Dr. Irineu Mazzaro, pela ajuda na obtenção de difratograma de raios X, na confecção das peças de PZT, e pelas críticas construtivas.

Aos professores Dr. Germano B. Afonso, Dr. Liu Kai e Dr. Bin Kan Cheng, pela amizade e incentivo constante.

Aos Eng^o. Rogério R. Moro, Coordenador Geral, e Eng^o. David S. Resende, Gerente do Departamento de Eletrotécnica, do Laboratório Central de Eletrotécnica e Eletrônica - LAC (convênio COPEL-UFPR), pelo apoio e incentivo.

Aos colegas Schaefer, Carlos, Marco, Marcelo e Salkovski, do Departamento de Eletrotécnica do LAC; Uada, do Departamento de Eletrônica do LAC; Henke e Osniido, do Departamento Físico Químico do LAC; Tomaz, Adelino, J. Maria e Oscar, do Departamento de Medição; Rogich, do Departamento de Engenharia Eletromecânica, pela ajuda na parte experimental.

Aos colegas Adelson e Rodrigues, do LAC, pela confecção dos desenhos.

Aos colegas Naliwaiko, Ivan e Alvin, do LAC, pela ajuda na utilização de microcomputador.

Ao colega Tadeu, da Superintendência Regional de Curitiba, pelo auxílio no português.

A todos que, embora não relacionados aqui, sempre nos dirigiam palavras de estímulo e consideração.

SUMÁRIO

	<u>RESUMO</u>	viii
	<u>ABSTRACT</u>	ix
	<u>INTRODUÇÃO</u>	1
1	<u>PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO</u>	3
2	<u>DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL</u>	7
2.1	CARACTERIZAÇÃO DA CERÂMICA PZT.....	7
2.1.1	CONSTANTE PIEZELÉTRICA.....	7
2.1.2	PERMISSIVIDADE RELATIVA.....	12
2.1.3	DENSIDADE.....	13
2.1.4	FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA E ANTI- RESSONÂNCIA.....	13
2.1.5	DIFRATOGRAMA DE RAIOS X.....	15
2.1.6	MICROESTRUTURA.....	15
2.1.7	RESUMO.....	16
2.2	MONTAGEM MECÂNICA.....	16
2.3	INTERFERÔMETRO DE FABRY-PEROT.....	20
2.4	FONTE LUMINOSA, DETECTOR ÓPTICO E CIRCUITO ELETRÔNICO.....	23
2.4.1	FONTE LUMINOSA.....	23
2.4.2	DETECTOR ÓPTICO E CIRCUITO ELETRÔNICO....	24
3	<u>RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO</u>	27
	<u>CONCLUSÕES</u>	32
	<u>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</u>	34
	<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	36

RESUMO

A cerâmica piezelétrica PZT, quando próxima à transição morfotrópica, $Pb(Zr_{0,53}Ti_{0,47})O_3$, apresenta grandes valores do fator de acoplamento K e da constante piezelétrica d_{33} . Essas características particulares favorecem a sua utilização para determinar campos elétricos alternados por meio do efeito piezelétrico inverso. A variação de comprimento da PZT, quando submetida a ação do campo elétrico de tensão alternada, é medida por um interferômetro de Fabry-Perot. O ensaio do transdutor piezelétrico óptico é realizado com o mesmo instalado num barramento, aplicando-se tensão alternada variável entre este barramento e outro a uma distância em torno de 2 metros, de zero a 92kV (60Hz). Obteve-se, com este dispositivo, boa linearidade, sensibilidade e precisão. Os resultados obtidos com base nesse princípio mostraram a sua viabilidade, no que se refere à confecção de transformadores de potencial não convencionais.

ABSTRACT

The piezoelectric ceramic PZT, with its compositions lying near the morphotropic phase, $\text{Pb}(\text{Zr}_{0,53}\text{Ti}_{0,47})\text{O}_3$, has high values of electromechanical coupling factor K and piezoelectric constant d_{33} . These special characteristics are useful for construction of transducer to determine the alternating current electric field by its inverse piezoelectric effect. The piezoelectric optic transducer developed in this work is composed of PZT and Fabry-Perot interferometer. When the transducer is submitted to an electric field, the dimensions of PZT will be changed according to the field strength, and this change will be detected by the Fabry-Perot interferometer. The test was performed with the transducer attached to a busbar and was applied a voltage from zero to 92kV (@ 60Hz). The results showed that the transducer has a very good linearity, sensitivity and precision, and is feasible its application for construction of a non conventional potential transformer.

INTRODUÇÃO

Há duas décadas, a Metrologia de alta tensão vem buscando novas concepções para a substituição dos tradicionais transformadores de potencial e corrente normalmente utilizados em medição e proteção em alta tensão e extra alta tensão^(1,2,3).

Esses desenvolvimentos se restringiram a modelos de laboratório ou protótipos instalados em linhas de transmissão ou subestações de energia elétrica. Com isto, procurava-se alcançar os seguintes objetivos:

- Desenvolver dispositivos de medida e proteção com desempenho técnico igual ou superior aos clássicos⁽⁴⁾ transformadores de potencial e corrente;
- Oferecer uma redução de custo e fácil extensão ao nível de extra alta tensão.

Estes dispositivos de medida, chamados de transformadores de potencial e corrente não convencionais, podem ser classificados nas seguintes categorias⁽²⁾:

- Sistema com pré-amplificador funcionando em tensão;
- Sistema com pré-amplificador funcionando em corrente;
- Sistemas híbridos, comportando um transformador de potencial clássico associado a um dos tipos acima descritos;
- Sistema com modulação, baseado nos seguintes princípios:

Modulação de luz, utilizando efeitos eletro-óptico⁽¹⁾ (Efeito Pockels^(5,6), efeito Kerr, efeito giro-óptico⁽⁷⁾ no quartzo), modulação de sinal, similar

àquelas desenvolvidas para os sistemas de transformadores de corrente (ópto-eletrônicos)⁽⁸⁾.

As cerâmicas piezelétricas são amplamente usadas na ciência e na indústria, em particular, como promotora de micromovimentos monitorados por campos elétricos^(9,10,11,12), bem como, sensoras de tensão⁽¹³⁾.

Neste trabalho é desenvolvido um transdutor, que faz parte de um TP (Transformador de Potencial) não convencional, que se chamará transdutor piezelétrico óptico, combinando o efeito piezelétrico inverso com a interferometria óptica, para medir tensão alternada.

No Capítulo 1, descrevemos o princípio de funcionamento do transdutor piezelétrico óptico.

No Capítulo 2, apresentamos dados experimentais obtidos sobre: PZT, montagem mecânica, interferômetro de Fabry-Perot, laser, detector óptico e circuito eletrônico utilizado.

No Capítulo 3, apresentamos os resultados experimentais obtidos em ensaios com tensão alternada (60Hz) e comentamos alguns fenômenos observados durante os ensaios sobre a sua utilização.

CAPÍTULO 1

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O transdutor piezoeletrico óptico, objeto deste trabalho, é composto de um interferômetro de Fabry-Perot como sensor de deslocamento, duas cerâmicas PZT como sensoras de campo elétrico e uma base metálica, conforme é mostrado na figura 1.1.

O interferômetro de Fabry-Perot é composto de dois semi-espelhos (espelho 1 e espelho 2), cada um fixado numa PZT. As faces semi-espelhadas desses espelhos são fixadas frente a frente, e através dos três parafusos na base (parafusos A, B e C), ajusta-se a distância e o paralelismo entre elas. A posição regulada é mantida pela força das três molas que envolvem os parafusos de ajuste.

As duas cerâmicas PZT utilizadas são de mesma qualidade e de mesmo comprimento. Com isso, suas dilatações térmicas são consideradas idênticas. As faces das PZT, opostas às de fixação dos semi-espelhos, são coladas às bases metálicas de materiais distintos. Os coeficientes de expansão térmica dos dois metais servem para compensar a dilatação térmica do primeiro semi-espelho e da própria base. Com isso, uma vez ajustado, o espaçamento do interferômetro será invariável com relação a mudanças de temperatura no transdutor.

O transdutor é fixado num dos dois barramentos, frontalmente a outro que lhe é paralelo, conforme é mostrado na figura 1.2.

Aplicando-se tensão alternada entre esses barramentos, submete-se o transdutor a um campo elétrico variável. Devido ao efeito piezoeletrico inverso, as PZT sofrem variações nas suas dimensões, proporcionais às variações da intensidade do

campo elétrico. Essas variações nas dimensões das PZT alteram o espaçamento entre os dolo semi-espelhos nelas fixados.

Ao conduzir um feixe de luz monocromático através do Interferômetro de Fabry-Perot, sua intensidade, na saída do Interferômetro, é uma função do espaçamento. Essa variação é detectada pelo fotodiodo A.

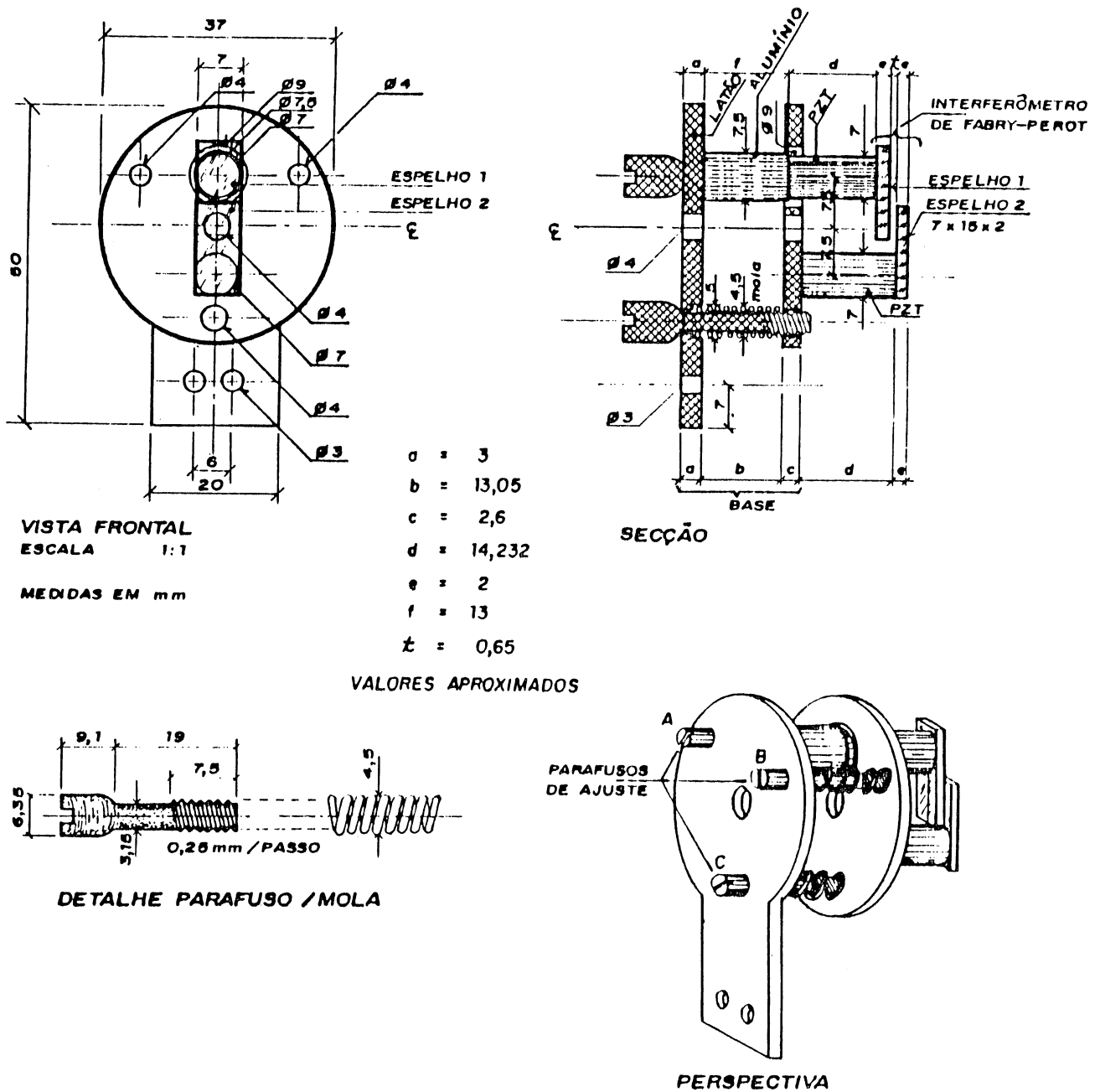


Fig. 1.1 - Transdutor Piezelétrico óptico.

A fonte de luz monocromática utilizada é um laser He-Ne. Como este não possui dispositivo de compensação, a sua

Intensidade é flutuante durante o tempo de estabilização térmica e mesmo após este (Fig. 2.18). A variação da intensidade do laser causa efeitos espúrios e aumenta o erro na resposta, a saber: 1. A variação da intensidade faz com que o fotodiodo A interprete erroneamente como sendo da variação de campo elétrico; 2. A variação da intensidade altera o formato da curva de Airy e conseqüentemente altera o valor da resposta.

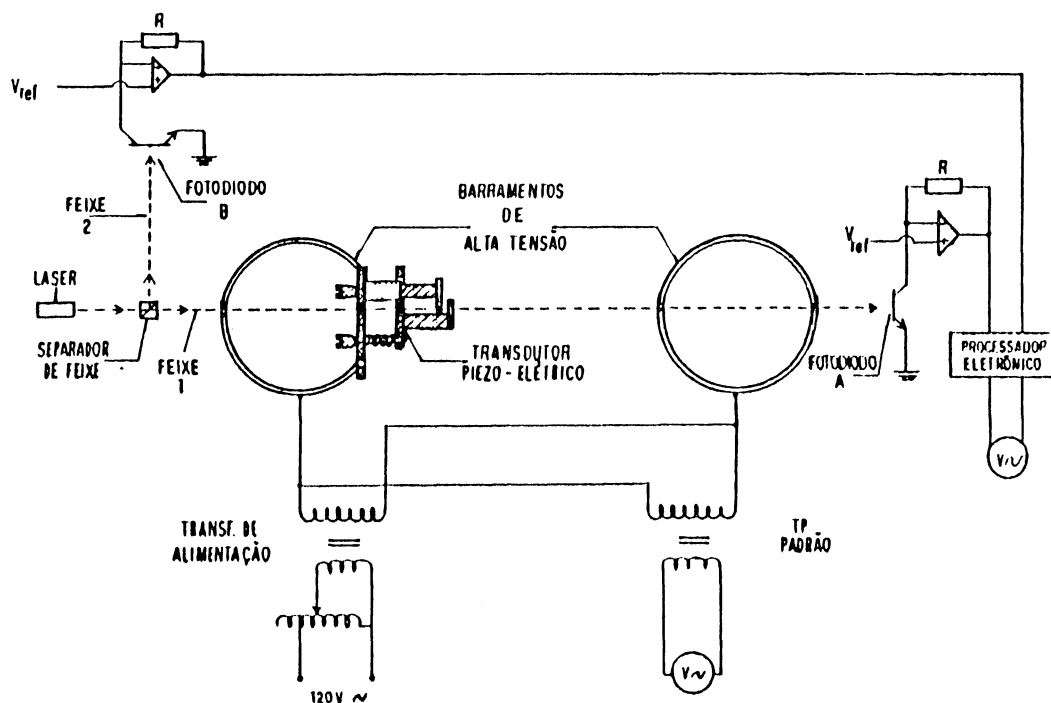


Fig. 1.2 - Montagem do transdutor piezoelétrico óptico no barramento.

O erro causado pelo primeiro efeito é cancelado pela utilização de um circuito eletrônico compensador, composto de um separador de feixe, um fotodiodo B, e um processador eletrônico. A utilização deste circuito não elimina o erro causado pelo segundo efeito. Este último é minimizado pela diminuição de tempo na realização do experimento.

Tomando as duas medidas de correção, o sinal na saída do processador eletrônico praticamente representa a tensão alternada aplicada entre os dois barramentos.

A tensão entre os dois barramentos é fornecida por um transformador elevador, cujo valor é monitorado por um TP (transformador de potencial) padrão com 0,1% de exatidão. A

tensão secundária do TP padrão é a referência para a determinação da precisão e da sensibilidade do transdutor, fazendo-se a comparação entre essa tensão e o sinal na saída do circuito eletrônico.

CAPÍTULO 2

DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA CERÂMICA PZT

O conhecimento das propriedades de um elemento piezelétrico é o primeiro passo essencial para sua aplicação como transdutor. Isto é particularmente verdadeiro para as cerâmicas PZT, devido a variações de suas propriedades, decorrente do processo de fabricação, e por serem incompletos ou inexistentes os dados fornecidos pelos fabricantes.

As cerâmicas PZT, utilizadas nos ensaios, são soluções sólidas de PbZrO_3 e PbTiO_3 , representadas pela fórmula $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$, cuja composição está próxima à transição morfotrópica ($x \sim 0,53$). A direção de polarização das cerâmicas é a do eixo de simetria de ordem infinita (C_{∞}), e quando polarizadas comportam-se como cristais da classe ∞m ⁽¹⁴⁾. As cerâmicas comerciais usadas têm a forma de cilindros, com diâmetro e altura de 7mm e 15mm, respectivamente, de cor amarelo claro e são de procedência Argentina. A nomenclatura e simbologia aqui utilizada é a da IRE Standard of Piezoelectric Crystals⁽¹⁵⁾.

2.1.1 CONSTANTE PIEZELÉTRICA d_{33}

As faces das cerâmicas foram tornadas paralelas e polidas. Uma das faces foi fixada com araldite sobre uma estrutura metálica, e a outra, após pintura com uma fina camada de tinta de prata, teve fixado sobre si um dos dois semi-espelhos do interferômetro de Fabry-Perot. O outro semi-espelho foi fixado na estrutura, conforme é mostrado na figura 2.1. Nessa mesma figura, mostramos a formação das franjas circulares sobre um anteparo, após o feixe de raios laser ter sido transformado em fonte extensa, pela colocação de uma

folha de papel manteiga no caminho do feixe, antes da passagem pelo interferômetro. Esta formação é indicação de paralelismo entre as superfícies dos dois semi-espelhos.

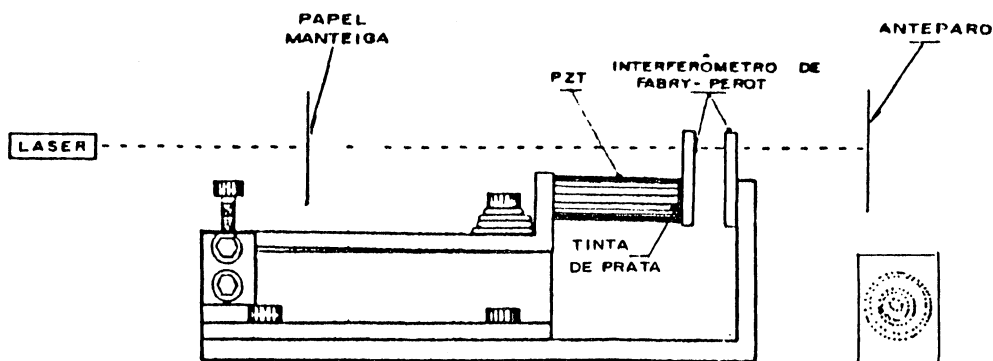


Fig. 2.1 - Verificação do paralelismo entre os dois semi-espelhos.

No experimento para obtenção da constante piezoeletrica d_{33} , utilizamos o arranjo da figura 2.2.

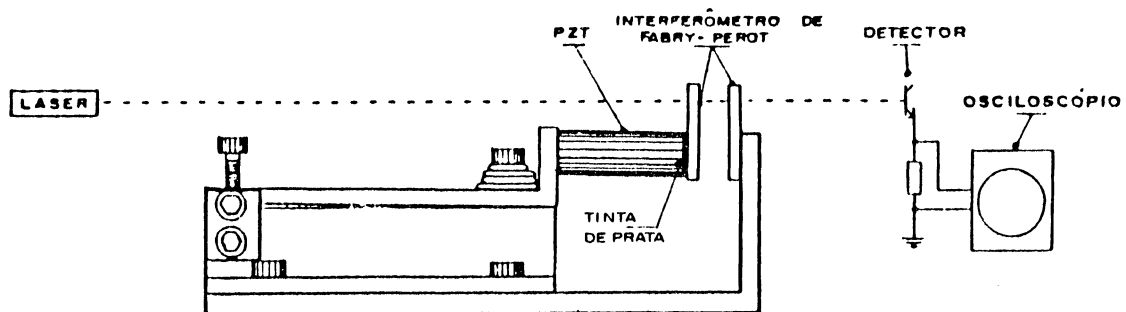


Fig. 2.2 - Experimento para obtenção da constante piezoeletrica d_{33} .

Aplicou-se, sobre a cerâmica, uma tensão contínua, fazendo-a variar de zero a 8kV num tempo em torno de cinco segundos. A variação da intensidade luminosa, decorrente da variação da distância entre os semi-espelhos, ocasionada pela variação do comprimento da cerâmica, quando dentro de um campo elétrico variável, foi medida pelo detector óptico e registrada

em um osciloscópio, modelo 208 da Nicolet Instrument Corporation, a qual está mostrada na figura 2.3.

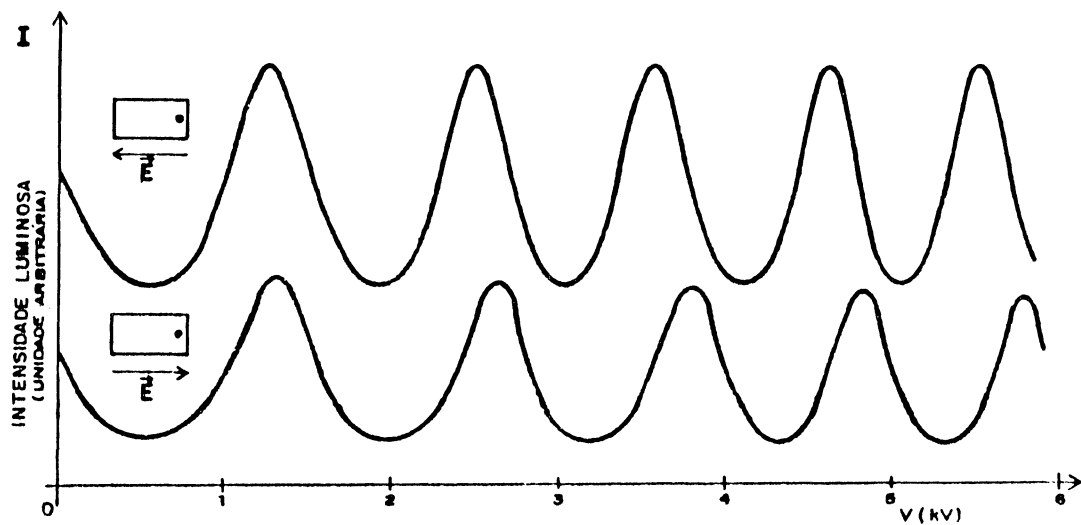


Fig. 2.3 - Variação da intensidade luminosa em relação à intensidade de campo elétrico aplicado.

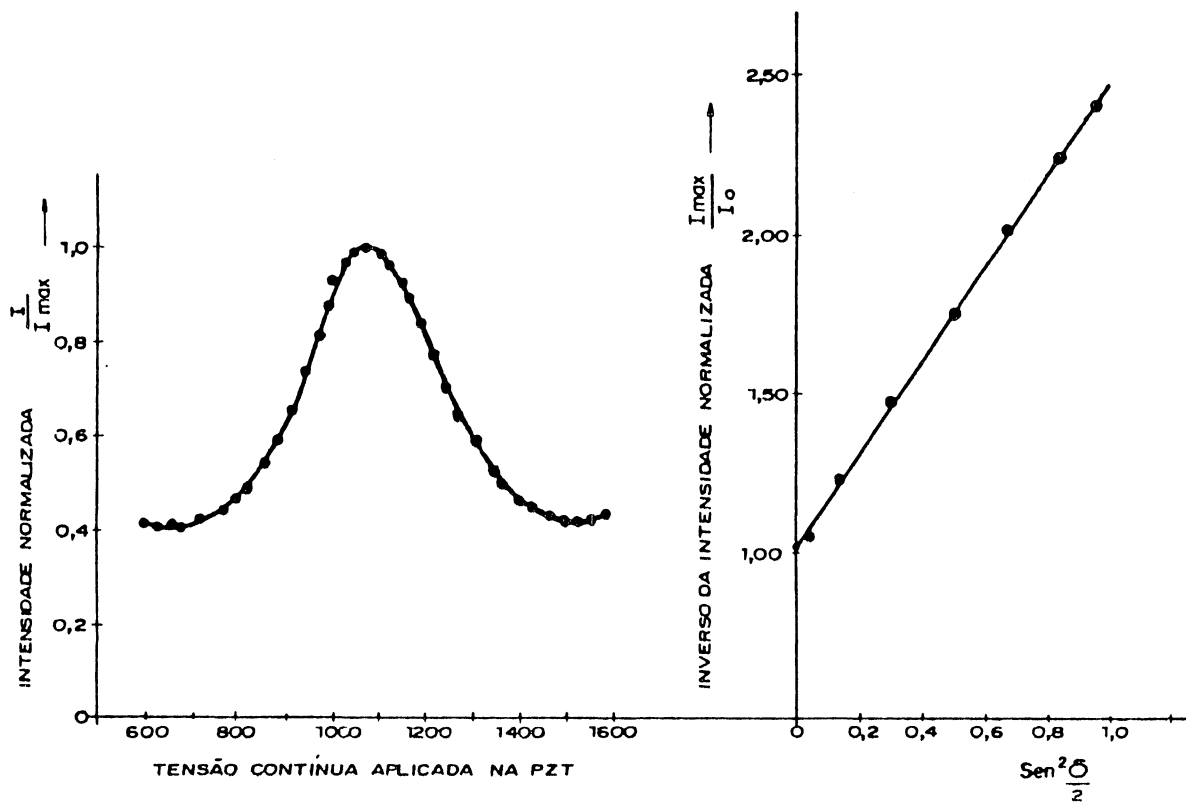


Fig. 2.4 - Comprovação experimental da função de Airy.

Na figura 2.3, a curva superior representa o caso de aplicação de um campo elétrico contrário ao sentido de polarização da cerâmica, e a curva inferior o caso inverso.

As duas curvas demonstram que a constante piezelétrica d_{33} varia com a intensidade do campo elétrico aplicado⁽⁰⁹⁾ e com o sentido deste em relação ao da polarização na cerâmica. Entretanto, cada ciclo da curva é praticamente a função de Airy conforme se constata pelas figuras 2.4a e 2.4b

Na figura 2.5, mostramos a forma da resposta com a aplicação de tensão contínua de 8kV na PZT, e na figura 2.6, a da retirada de tensão. As curvas mostram nitidamente que a constante piezelétrica d_{33} também varia com o tempo de aplicação⁽⁰⁹⁾.

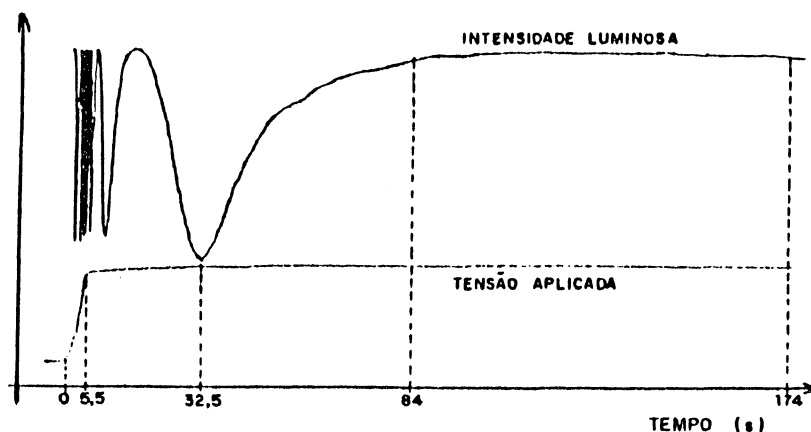


Fig. 2.5 - Variação da Intensidade luminosa em relação ao tempo da aplicação de tensão.

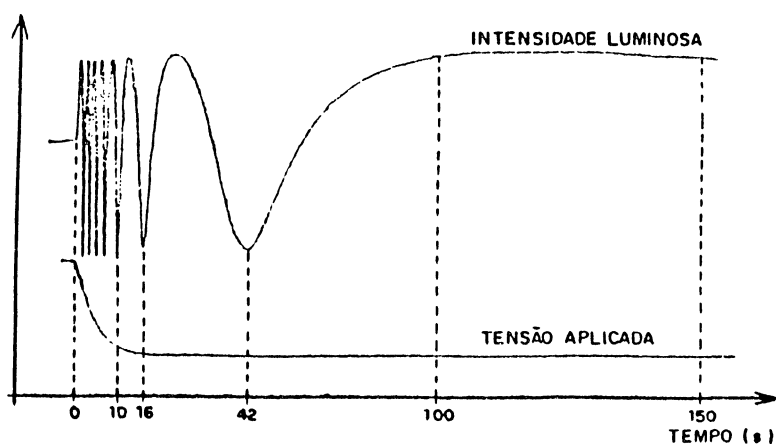


Fig. 2.6 - Variação da intensidade luminosa em relação ao tempo de retirada da tensão aplicada.

A variação de dimensão Δl foi determinada pela contagem do deslocamento das franjas de interferência. O valor da variação de dimensão Δl é calculada pela seguinte equação:

$$\Delta l = \frac{\lambda m}{2} \quad (2.1)$$

onde m é o número inteiro de deslocamento das franjas e λ é o comprimento de onda da luz do laser.

A constante piezométrica d_{33} é calculada aproximadamente pela equação 2.2:

$$d_{33} = \frac{\Delta l}{V} \quad (2.2)$$

onde V é a tensão aplicada.

Na tabela 2.1 apresentamos os resultados obtidos nas três amostras ensaiadas conforme a curva superior da figura 2.3.

Tabela 2.1 - Constante piezométrica d_{33} .

Amostra	Diâmetro (mm)	Comprim. (mm)	d_{33} (pm/V)	Obs.
A	7	14,97	534 ± 20	*
B	7	14,91	422 ± 08	*
B ₁	7	14,91	371 ± 04	**
C	7	15,01	572 ± 14	*
C ₁	7	14,23	510 ± 04	***

* - Foi aplicado nas amostras, previamente, uma tensão AC de 60Hz, variando entre zero e 3,3kV, com velocidade em torno de 300V/s.

** - A amostra B₁ é a amostra B, porém, sem aplicação prévia de tensão AC.

*** - A amostra C₁ é a amostra C, porém, a constante d_{33} foi determinada pela aplicação de campo alternado (60Hz) em torno de 400kV/m.

2.1.2 PERMISSIVIDADE RELATIVA

Cinco amostras foram usadas para se determinar a permissividade relativa. As faces das amostras foram lapidadas e polidas, para em seguida serem pintadas com tinta de prata (fig. 2.7).

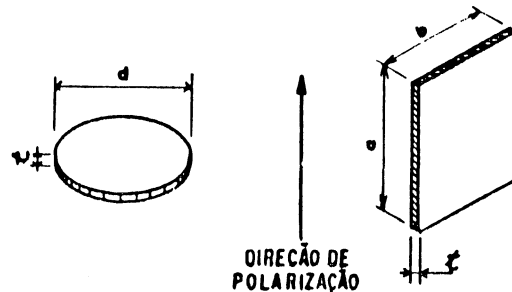


Fig. 2.7 - Formato das amostras utilizadas nos ensaios de permissividade relativa e densidade.

As medidas de capacitância e da tangente do ângulo de perda, foram efetuadas com uma ponte da GenRad, modelo 1657RLC Digibridge. Nas tabelas 2.2, 2.3 e 2.4, apresentamos os resultados obtidos.

Tabela 2.2 - Características geométricas das amostras.

Amostra	Espessura t (mm)	Diâmetro d (mm)	Altura a (mm)	Largura b (mm)
1	1,04±0,01	8,99±0,01	-	-
2	1,00±0,01	7,01±0,01	-	-
3	0,99±0,01	7,01±0,01	-	-
4	0,99±0,01	-	9,49±0,01	6,41±0,01
5	1,37±0,01	-	8,82±0,01	6,21±0,01

Tabela 2.3 - Permissividade relativa na direção de polarização.

Frequência	Grandeza	Amostra		
		1	2	3
1kHz	$\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$	1124±8	1283±5	1228±5
	tg δ	0,018±0,001	0,019±0,001	0,022±0,001
120Hz	$\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$	1152±9	1301±5	1260±5
	tg δ	0,020±0,001	0,023±0,001	0,022±0,001

Tabela 2.4 - Permissividade relativa perpendicular à direção de polarização.

Frequência	Grandeza	Amostra	
		4	5
1kHz	ϵ_{11}^T	1227±5	1245±13
	ϵ_{22}^T		
	ϵ_0		
	tg δ	0,020±0,001	0,020±0,001
120Hz	ϵ_{11}^T	1266±6	1284±13
	ϵ_{22}^T		
	ϵ_0		
	tg δ	0,023±0,001	0,023±0,001

2.1.3 DENSIDADE

As densidades aparente das cerâmicas PZT foram calculadas usando-se a massa e volume das mesmas. Na tabela 2.5, mostramos os resultados obtidos para cinco amostras.

Tabela 2.5 - Densidade de cinco amostras de cerâmicas PZT.

Amostra	I	II	III	IV	V
Densidade (kg/dm ³)	17,40±0,05	17,69±0,03	17,63±0,03	17,59±0,03	17,32±0,07

A média ponderada das médias é (7,60±0,10)kg/dm³.

2.1.4 FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA E ANTI-RESSONÂNCIA

As frequências de ressonância e anti-ressonância foram determinadas para diversos modos, com auxílio de um analisador de circuito, modelo 3577A da Hewlett-Packard. Na figura 2.8 mostramos o resultado obtido com a amostra C.

As frequências de ressonância e anti-ressonância para o primeiro modo são mostradas na tabela 2.6.

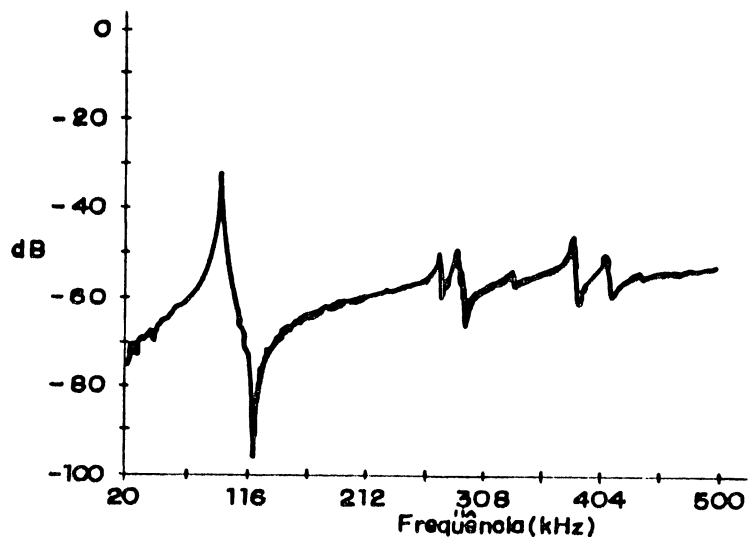


Fig. 2.8 - Espectro de ressonância e anti-ressonância da amostra C.

Tabela 2.6 - Frequências de ressonância e anti-ressonância.

Amostra	Comprimento (mm)	Frequência (kHz)	
		Ressonância	Anti-ressonância
A	14,97	93,2	117,2
B	14,91	94,4	118,4
C	15,01	90,8	120,8

De posse das frequências de ressonância, da densidade e do comprimento das amostras, podemos estimar as constantes elásticas s_{33}^D e s_{33}^E , o coeficiente de acoplamento k_{33}^I , constante de frequência longitudinal $N_{3a}^{(14,15)}$ e a constante piezoeétrica d_{33} . Na tabela 2.7 mostramos os resultados obtidos.

Tabela 2.7 - Características das cerâmicas PZT.

Amostra	Coefic. de acoplamento k_{33}^I	C. elast. (pm^2/N)		Const. de freq. N_{3a} (kHz.mm)	Const. Piezelét. d_{33} (pm/V)
		s_{33}^D	s_{33}^E		
A	0,65	10,7	18,3	1754	277
B	0,64	10,8	18,1	1765	288
C	0,70	10,0	19,4	1813	321

2.1.5 DIFRATOGRAMA DE RAIOS X

O difratograma de raios X mostrado na figura 2.9, foi obtido utilizando-se radiação $\text{CuK}\alpha$ ($1,5418\text{\AA}$).

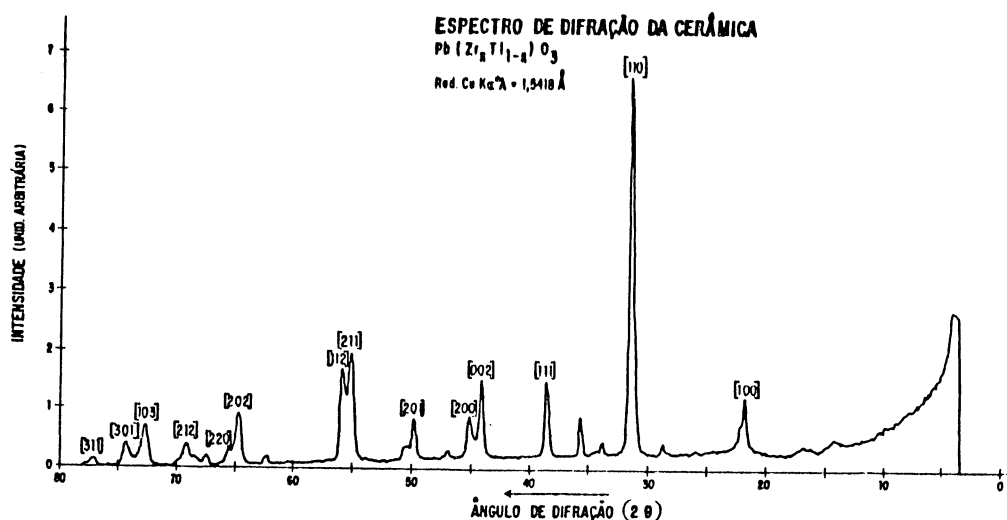


Fig. 2.9 - Espectro de difração de raios X da cerâmica PZT.

A interpretação das linhas foi obtida a partir dos dados da referência 18.

2.1.6 MICROESTRUTURA

Nas figuras 2.10 e 2.11 mostramos a microestrutura de uma amostra da cerâmica PZT. Nessas amostras, constatamos que o diâmetro dos grãos varia entre $5\mu\text{m}$ e $8\mu\text{m}$, tendo em média $3,17 \times 10^4$ grãos/ mm^3 . A dureza Vickers (5gf) era de aproximadamente 370HV. Constatamos, também, a existência de inúmeros poros, cujo diâmetro variava entre $15\mu\text{m}$ e $20\mu\text{m}$.

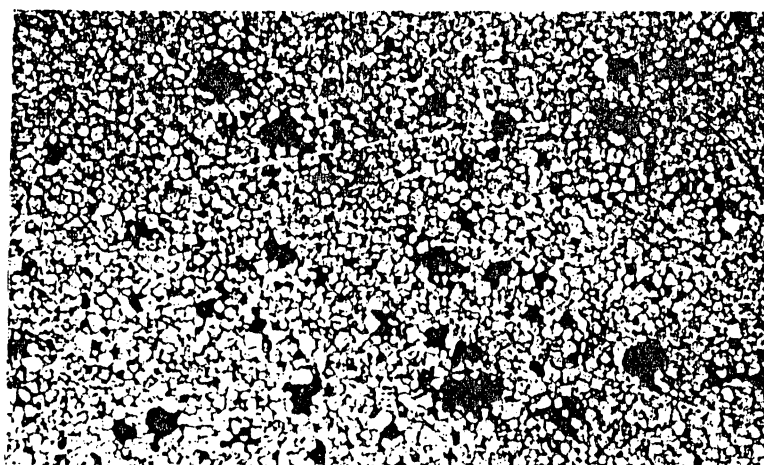


Fig. 2.10 - Microestrutura da PZT, parte interior (aumento 500X).

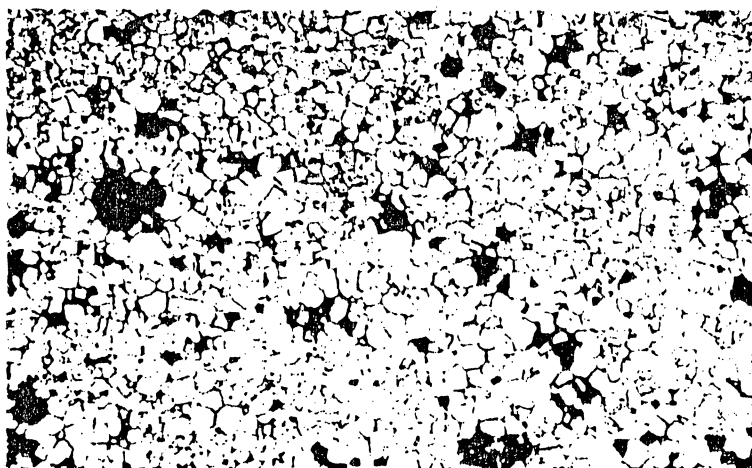


Fig. 2.11 - Microestrutura da PZT, parte exterior (aumento 500X).

2.1.7 RESUMO

Os resultados observados demonstraram que as PZT por nós utilizadas, apresentam características similares a aquelas dos tipos PZT-4 da Vernitron Corporation⁽¹⁴⁾ (USA), PZT-19 e PZT-300 de fabricação RUSSA⁽¹⁹⁾, PXE41 e PXE42 da PHILIPS, e P7-62 de fabricação FRANCESA.

2.2 MONTAGEM MECÂNICA

O transdutor piezelétrico-óptico, mostrado na figura 1.1, consiste de três partes:

- estrutura metálica;
- sensor elétrico (cerâmicas PZT);
- sensor de deslocamento (interferômetro de Fabry-Perot).

A estrutura metálica é composta de dois discos de latão, um calço de alumínio, três parafusos de latão e três molas.

Os dois discos e os três parafusos de latão, após suas confecções, sofreram um recozimento térmico a uma temperatura de aproximadamente 350 °C, durante dez minutos. A seguir abaixava-se a temperatura lentamente até a do ambiente.

O processo de recozimento térmico para o calço de alumínio é idêntico ao do latão, porém, com a temperatura em torno de 150 °C.

Sobre a estrutura metálica são fixadas duas cerâmicas PZT similares, e sobre estas, dois semi-espelhos, os quais constituem o interferômetro de Fabry-Perot.

A existência do calço de alumínio tem a finalidade de permitir a compensação do efeito de dilatação térmica do primeiro semi-espelho e da própria estrutura.

A utilização de duas cerâmicas idênticas, de PZT, tem a finalidade de: 1. Compensar as suas próprias dilatações térmicas; 2. Possibilitar, pela mudança do sentido de polarização na montagem, a extensão das faixas de medida do campo elétrico; 3. Uniformizar o máximo possível o campo elétrico atuante nas PZT.

A condição para que o espaçamento t entre os dois semi-espelhos permaneça constante com a variação de temperatura é, numa primeira aproximação, dada por:

$$(b+c)\alpha_l = f\alpha_a + e\alpha_v \quad (2.3)$$

$$t = (b+c) - (f+e) \quad (2.4)$$

onde b , c , f e e são mostrados na figura 1.1, e α_l , α_a e α_v são valores médios (0-100 °C) dos coeficientes de dilatação térmica do latão, alumínio e vidro, respectivamente.

Através dos três parafusos, o espaçamento t é, então, regulado o mais próximo possível do valor calculado, e em seguida é feita a calibração final.

Existem dois métodos para se efetuar a calibração final. O primeiro é feito em três etapas, e o segundo, em duas.

As primeiras etapas de calibração final são idênticas para os dois métodos. A finalidade da primeira etapa de calibração final consiste em encontrar, pelo ajuste dos três parafusos, uma posição na qual o espaçamento t entre os dois

semi-espelhos permanece constante, dentro de uma determinada faixa de temperatura de trabalho.

A segunda etapa do primeiro método consiste em medir as intensidades luminosas máxima e mínima da curva de Airy. Com base nestes valores, verifica-se, no ajuste da primeira etapa, se o espaçamento t ficou no ponto ideal de trabalho. Caso seja necessário, faz-se um novo ajuste numa terceira etapa, levando o espaçamento t para o ponto ideal de trabalho.

A segunda etapa do segundo método, consiste em ajustar o espaçamento t até o ponto ideal de trabalho, através da comparação entre a forma de onda da tensão aplicada e da resposta. A seguir, explanamos, em detalhes, o processo de cada etapa.

Na primeira etapa da calibração final, o transdutor foi colocado dentro de um recipiente de temperatura variável, conforme é mostrado na figura 2.12.

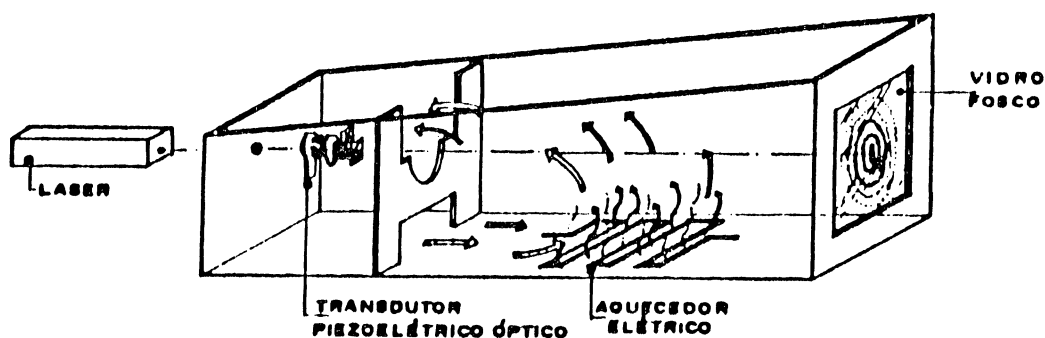


Fig. 2.12 - Montagem para calibração final de compensação térmica.

Esse recipiente era composto de dois compartimentos separados por uma placa divisória, com aberturas no topo e na base. O transdutor foi colocado num deles, cuja temperatura era verificada por um termômetro. No outro foi colocado um aquecedor elétrico, cuja potência era controlada por uma fonte de tensão variável. O ar aquecido pelo aquecedor elétrico era transportado para o compartimento do transdutor através da abertura do topo da placa divisória, retornando ao compartimento do aquecedor pela abertura do fundo.

Com os dois semi-espelhos previamente regulados, formam-se franjas circulares no vidro fosco posto no lado oposto à fonte luminosa extensa (pedaço de papel manteiga). Se com o aumento da temperatura, as franjas se deslocam para o centro, por exemplo, é indício de que o espaçamento diminuiu. Isso significa que o espaçamento inicialmente regulado é menor que o valor exato. Por tentativas, procura-se o ajuste ideal, agindo-se sobre os três parafusos de ajuste da distância entre os semi-espelhos. Esta operação só é finalizada quando não houver deslocamento de franjas com a variação de temperatura. No nosso ensaio, com uma variação de temperatura entre 20 °C e 50 °C, não foi observado o deslocamento de franjas.

Com o transdutor fora do recipiente, em temperatura ambiente, prossegue-se a segunda etapa de calibração do primeiro método. O processo consiste em emitir um feixe do laser que atravessa o interferômetro e aplicar um campo elétrico contínuo, numa PZT, variando de zero a 150kV/m. A intensidade do feixe, após o interferômetro, é detectada por um fotodiodo. O sinal detectado contém em torno de dois ciclos de padrão de interferência, e o seu valor máximo é tomado como referência para a terceira etapa de calibração desse método.

Na terceira etapa, aplica-se na mesma PZT, um campo elétrico alternado (60Hz) com intensidade em torno de 200kV/m, reduzindo-o, gradualmente, até zero, para acelerar o retorno da condição regulada na primeira etapa. Nesta condição de campo elétrico aplicado nulo, através dos três parafusos, regula-se o espaçamento do interferômetro, com o mínimo de deslocamento, até a intensidade do feixe detectada indicar em torno de 78% (figura 2.15) da intensidade máxima. Esse ponto corresponde ao ponto ideal de trabalho na curva de Airy.

Na segunda etapa do segundo método, com o transdutor em temperatura ambiente, emite-se um feixe do laser que atravessa o interferômetro e aplica-se um campo elétrico alternado (60Hz) numa PZT. A forma da intensidade luminosa detectada por um fotodiodo, após o interferômetro, é comparada com a da tensão aplicada, no osciloscópio. A tensão alternada é aumentada gradualmente até a onda da resposta começar a se deformar. Se a deformação só ocorrer na região máxima da meia

onda positiva ou negativa, é sinal de que o espaçamento t , regulado na primeira etapa, não está no ponto ideal de trabalho. Uma pequena regulagem é feita nos três parafusos, corrigindo a onda da resposta, de modo a ficar praticamente simétrica entre a meia onda positiva e a meia onda negativa.

As regulagens das últimas etapas, na calibração final, podem afastar o espaçamento t , regulado nas primeiras etapas (que corresponde a um espaçamento invariável em relação à variação de temperatura), uma distância que chega a em torno de 3000\AA , aproximadamente um ciclo da curva de Airy. Caso esse espaçamento regulado, que corresponde ao ponto ideal de trabalho, seja decorrente de aumento de comprimento do latão, uma variação de 30°C de temperatura do ambiente causaria um afastamento em torno de 1.8\AA desse espaçamento regulado devido às dilatações térmicas dos componentes do transdutor. Esse pequeno afastamento praticamente não afetará a exatidão do transdutor.

2.3 INTERFERÔMETRO DE FABRY-PEROT

Embora pudéssemos ter utilizado outras técnicas para medir o efeito piezelétrico inverso (interferômetro de Michelson, franjas de Moire) das cerâmicas PZT, preferimos o uso do Fabry-Perot, em vista de sua simplicidade de construção. O interferômetro utilizado foi construído com duas placas planas de vidro óptico de $15 \times 7 \times 2\text{mm}^3$ e "flatness" ⁽¹⁷⁾ da ordem de $\lambda/5$. Sobre as faces ópticamente planas, confeccionamos semi-espelhos de alumínio, cuja refletividade era da ordem de 30%.

Os espelhos foram fixados sobre peças de cerâmica PZT, as quais, sob ação do campo elétrico, modificam o espaçamento t entre os semi-espelhos. O modo de operação do Fabry-Perot é aquele conhecido como "Central Spot Scanning" ⁽¹⁷⁾ e as variações da intensidade luminosa são detectadas por um fotodiodo.

Neste trabalho, o comportamento e as propriedades do interferômetro de Fabry-Perot são vistas sob o ponto de vista ideal clássico, isto é, os efeitos de difração, falta de planicidade, "slit" finito, etc., são desprezíveis e usa-se a

aproximação de óptica geométrica⁽¹⁷⁾. Nessas condições, a intensidade de luz transmitida é dada pela função de Airy

$$A(\delta) = \frac{I}{I_{\max}} = \frac{1}{1 + F \operatorname{sen}^2(\delta/2)} \quad (2.5)$$

onde: $F = 4R/(1-R)^2$ é o coeficiente de finesse; R é a refletividade dos semi-espelhos; $\delta = 2\pi(2t\cos\theta)/\lambda + \chi$, é a diferença de fase entre duas reflexões sucessivas; λ é o comprimento de onda da radiação na cavidade do laser; θ é o ângulo de incidência na reflexão entre os espelhos e χ é a mudança de fase na reflexão.

Na figura 2.13, mostramos a função de Airy $A(\delta)$, a derivada primeira $A'(\delta)$ e a derivada segunda $A''(\delta)$. O ponto L (L') de trabalho do interferômetro, é aquele M (M') onde a derivada primeira é mínima (máxima) ou aquele N (N') onde a derivada segunda é nula. Nessas regiões, o andamento da função de Airy é aproximadamente linear.

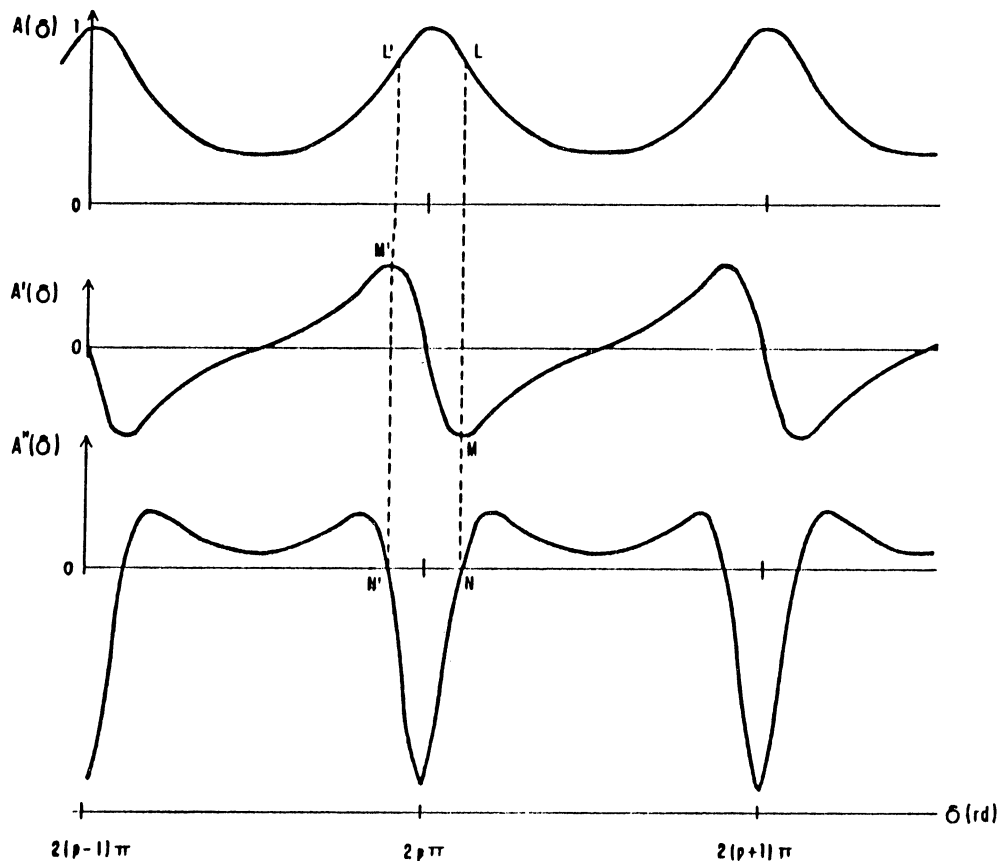


fig. 2.13 - Função de Airy e as suas primeira e segunda derivadas.

Na figura 2.14, mostramos como varia, teoricamente, a intensidade luminosa no foto detector em função da variação durante um período do campo elétrico alternado.

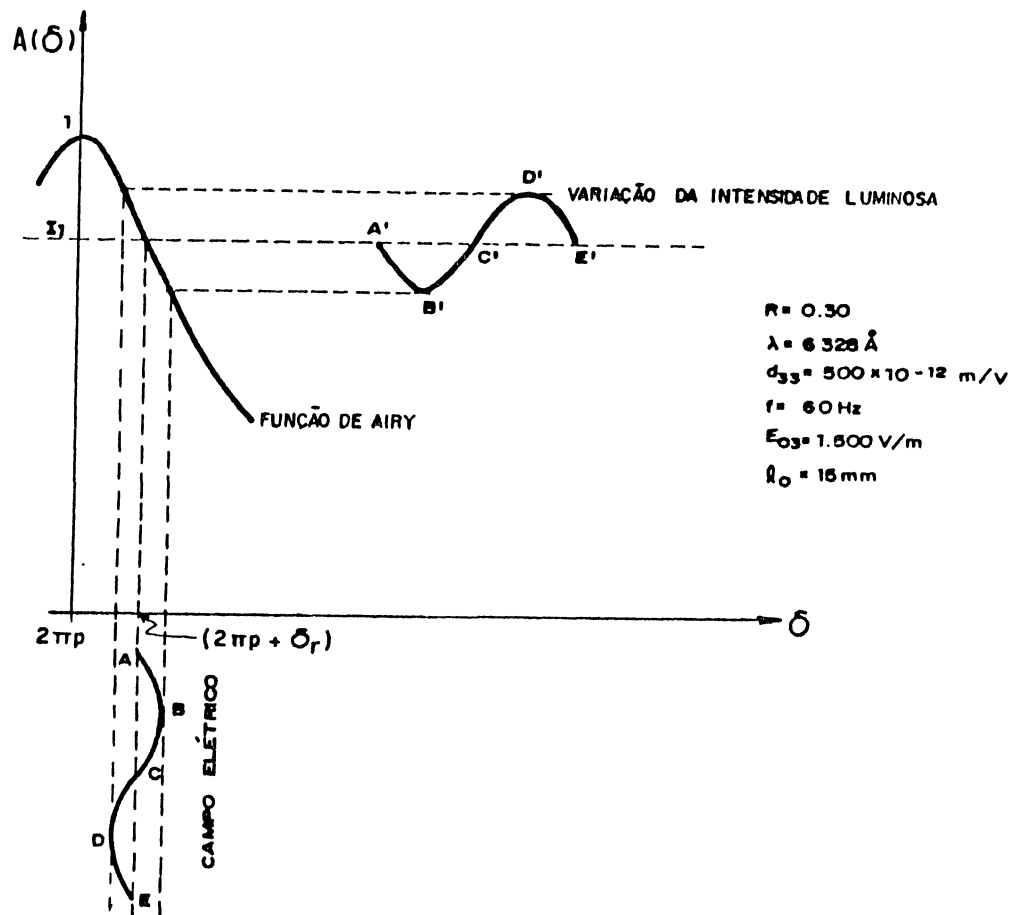


Fig. 2.14 - Forma da variação da intensidade luminosa em relação ao campo elétrico.

Sob ação deste campo elétrico, a intensidade luminosa será proporcional a:

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{I_{\max}}{1 + \frac{F}{2} - \frac{F}{2} \cos(2\pi p + \delta_1 + d \delta_1)} \\
 &\approx I_1 - \frac{I_1^2 F}{2 I_{\max}} \sin(2\pi p + \delta_1) d \delta_1 \quad (2.6)
 \end{aligned}$$

onde: I_1 é a intensidade luminosa no ponto de trabalho do interferômetro; $d\delta_1 = 4\pi l_0 d_{33} E_3 / \lambda$; l_0 é o comprimento da cerâmica PZT; d_{33} a constante piezoeétrica da cerâmica PZT; E_3 campo elétrico aplicado.

Na figura 2.15, mostramos a relação entre a Intensidade I e o campo elétrico E_3 , onde se constata a boa linearidade. Para as condições desta figura, uma variação de Intensidade de 10% acarreta uma variação de campo de 1120V/m, e uma variação da distância entre os semi-espelhos da ordem de 84Å.

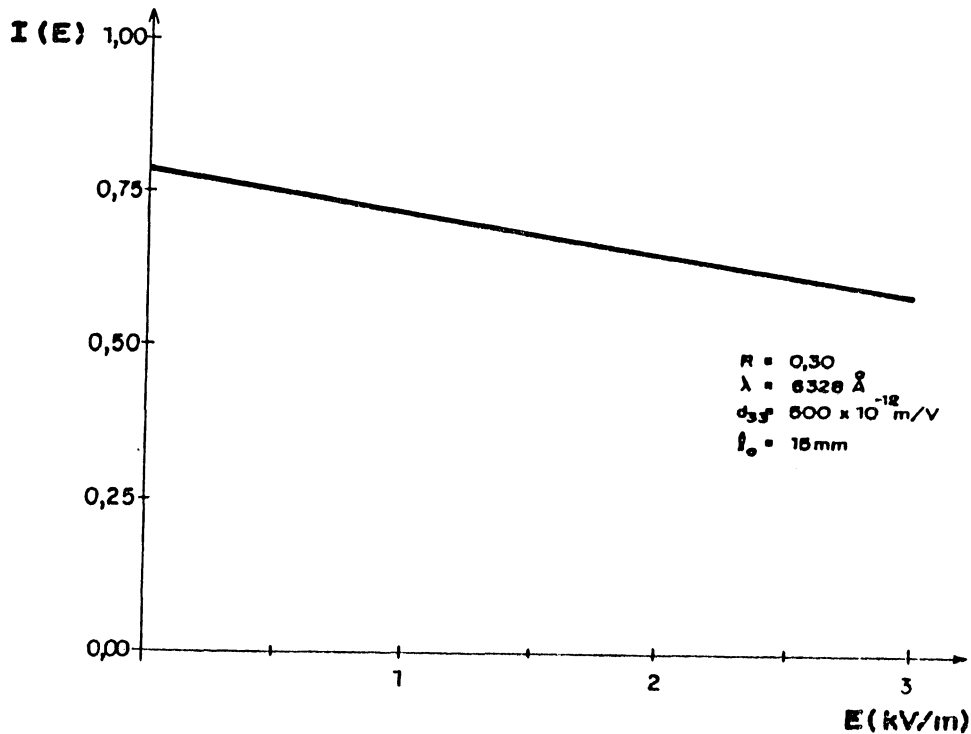


Fig. 2.15 - Intensidade luminosa (teórica) em relação ao campo elétrico.

2.4 FONTE LUMINOSA, DETECTOR ÓPTICO E CIRCUITO ELETRÔNICO

2.4.1 FONTE LUMINOSA

Como fonte luminosa, usamos um laser He-Ne da Spectra-Physics, modelo 155, com as seguintes características:

Potência:	0,5 mW
Comprimento de onda:	6328Å
Divergência do feixe:	1,0 mrad
Modo espacial:	TEM ₀₀
Ruído em amplitude (1kHz-100kHz):	0,3% rms
Polarização:	aleatória
Modo longitudinal (c/2L):	560 MHz

Este tipo de laser não possui compensação para estabilizar a sua intensidade de saída, tendo-se detectado uma variação em torno de $\pm 10\%$ do valor médio. Essa variação se altera conforme o tempo de estabilização térmica (Fig. 2.16). Para aproveitar o trecho de maior estabilidade, todos os ensaios foram feitos após o laser estar ligado a mais de duas horas.

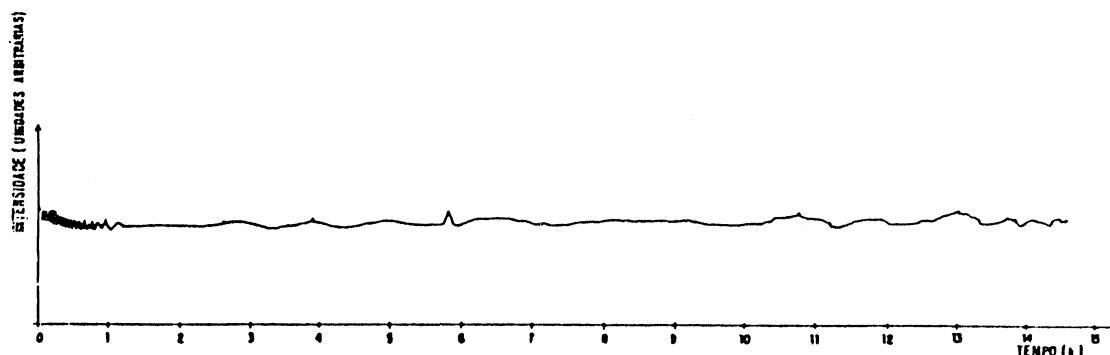


Fig. 2.16 - Variação da Intensidade do laser em relação ao tempo de aquecimento.

2.4.2 DETECTOR ÓPTICO E CIRCUITO ELETRÔNICO

Sendo a grandeza transduzida de natureza óptica, qualquer flutuação da fonte luminosa (ruído), irá alterar o resultado da medição. Para contornar este problema, desenvolvemos um circuito eletrônico compensador. Tal circuito é constituído de dois sensores ópticos S e R, um circuito amplificador inversor de ganho ajustável e um somador.

Na figura 2.17 representamos, esquematicamente, o circuito onde ϕ_1 , ϕ_2 , $\Delta\phi_1$ e $\Delta\phi_2$ são sinais ópticos, v_{s1} , v_{s2} e v_{s3} são sinais elétricos, k_1 , k_2 e k_α são constantes.

É fácil verificar que:

$$v_{s1} = - (k_1 \phi_1 + k_1 \Delta\phi_1 + k_1^n \text{senwt})$$

$$v_{s2} = - (k_2 \phi_2 + k_2 \Delta\phi_2)$$

e ajustando o valor k_α de tal modo que:

$$k_2 \phi_2 + k_2 \Delta\phi_2 = k_1 \phi_1 + k_1 \Delta\phi_1,$$

após o circuito somador teremos como saída $v_{s3} = k_1^n \text{senwt}$.

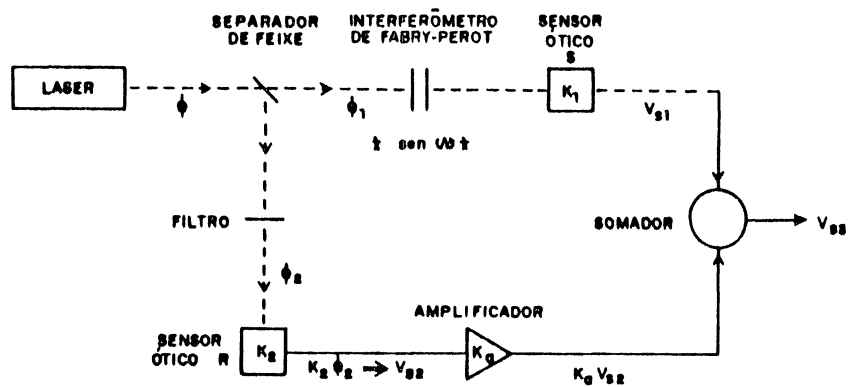


Fig. 2.17 - Esquema simplificado do funcionamento do TP óptico.

Na figura 2.18, mostramos o circuito eletrônico do sensor óptico (R ou S), o qual lineariza a conversão óptica-elétrica.

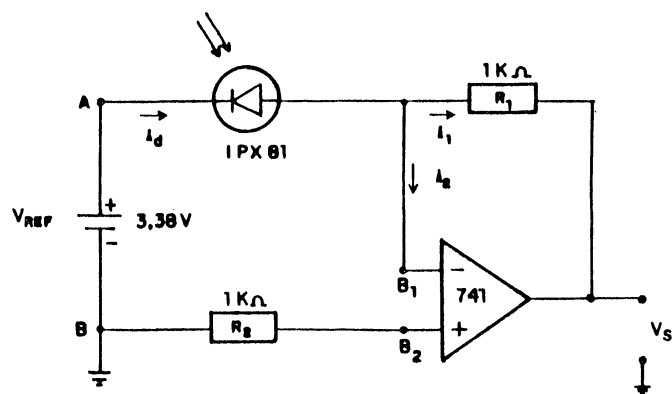


Fig. 2.18 - Esquema do funcionamento do sensor óptico.

O tipo dos fotodiodos utilizados neste trabalho é IPX81, da ICOTRON, cujas principais características técnicas são:

Foto corrente ($V_{CE} = 5V$, $FI = 1000 \text{ lx}$):	$\geq 0,63 \mu A$
Faixa de sensibilidade espectral:	4400 - 10700 Å
Melo ângulo:	16°
Tensão coletor emissor:	32V
Corrente de coletor:	50mA

Analisando, experimentalmente, as curvas características do fotodiodo, foi possível considerar que a corrente estimulada I_d pelo fluxo luminoso ϕ é, aproximadamente, linear com este, desde que a tensão V_{REF} permaneça constante. Para monitorar a corrente I_d construiu-se um conversor corrente-tensão de tal forma que:

$$v_s = -R_i I_d = -R_i k \phi = -const. \phi$$

Na figura 2.19, mostramos a linearidade do sensor óptico no intervalo de fluxo luminoso de interesse.

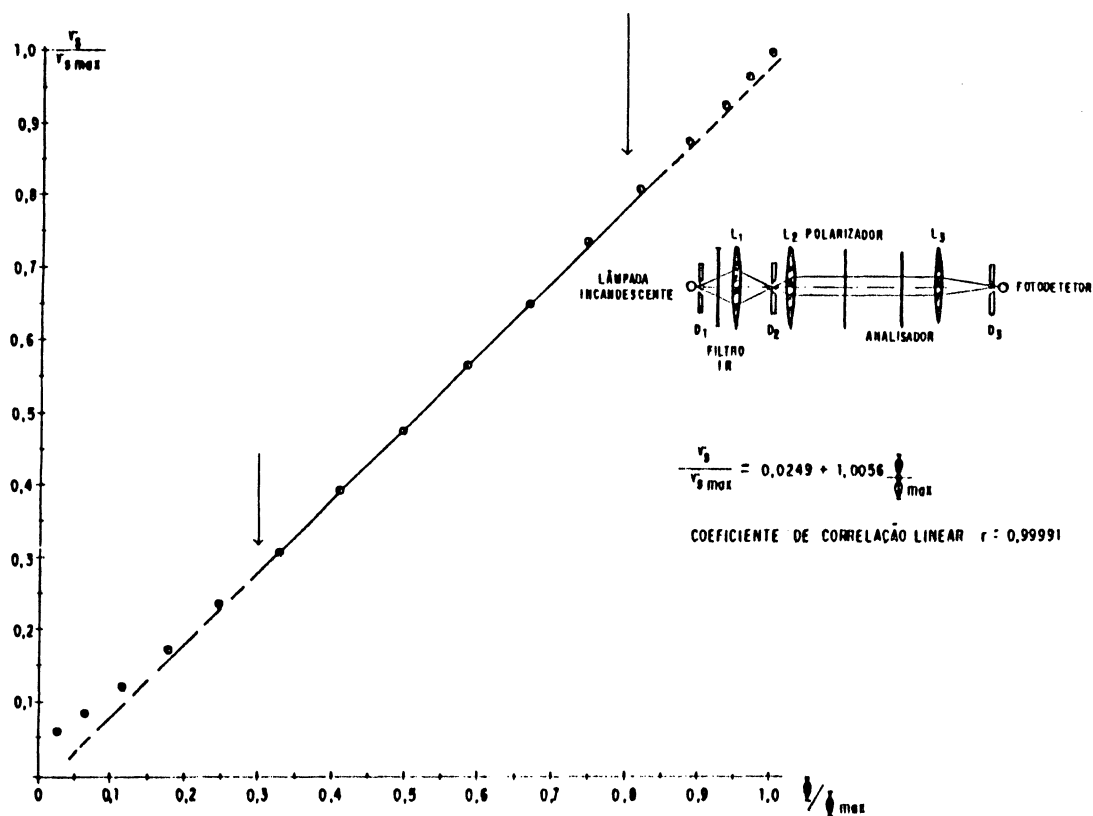


Fig. 2.19 - Resposta do sensor óptico em relação à intensidade da fonte.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

Tendo em vista que as duas cerâmicas do transdutor ocupam posições distintas dentro da geometria do arranjo da figura 1.2, o campo elétrico atua nas mesmas com intensidades diferentes. Levando em conta este fato, e considerando a polarização das PZT, é possível obter-se quatro arranjos distintos para o transdutor, pela simples troca de posição das cerâmicas. Assim, trocando-se a posição das duas cerâmicas, pode-se obter, com um mesmo transdutor, quatro respostas com sensibilidades distintas.

Denominamos como primeira combinação, aquela montagem na qual duas PZT aparecem instaladas com polarizações opostas. Nessa combinação, a variação do espaçamento do interferômetro é a soma das modificações de dimensão das duas PZT, de modo que um pequeno campo elétrico aplicado é suficiente para que o deslocamento ultrapasse a faixa linear de trabalho na curva de Airy. Devido à sua alta sensibilidade, essa combinação não tem utilização em medição de alta tensão.

Com uma PZT polarizada e a outra despolarizada, denominamos como segunda combinação, aquela montagem na qual a PZT despolarizada fixa o semi-espelho 1, e na terceira combinação, na qual fixa o semi-espelho 2. Nessas combinações, a variação do espaçamento é causada pela modificação da dimensão da PZT polarizada. Na figura 3.1, mostramos a curva da resposta, em relação à tensão aplicada entre os dois barramentos, utilizando a segunda combinação. Como o coeficiente de dilatação térmica é diferente entre as PZT polarizada e despolarizada, então a estrutura metálica do transdutor terá que incluir na sua compensação essa diferença de dilatação térmica.

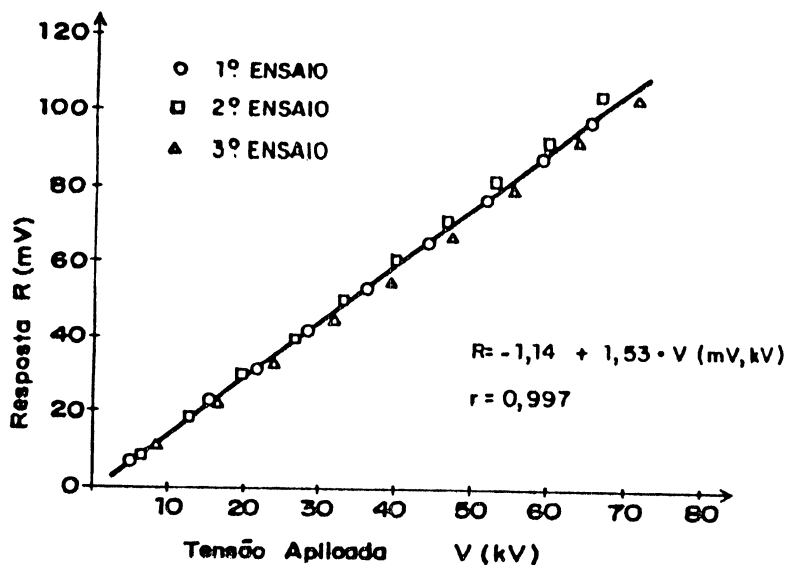


Fig. 3.1 - Resposta do transdutor em relação à tensão aplicada na segunda combinação.

Denominamos como quarta combinação, aquela montagem na qual as duas PZT são instaladas com suas polarizações de mesmo sentido. Nessa combinação, a variação do espaçamento do interferômetro é a diferença das modificações de dimensão das duas PZT. Conseqüentemente, uma pequena variação no espaçamento, corresponde a uma grande intensidade do campo elétrico aplicado.

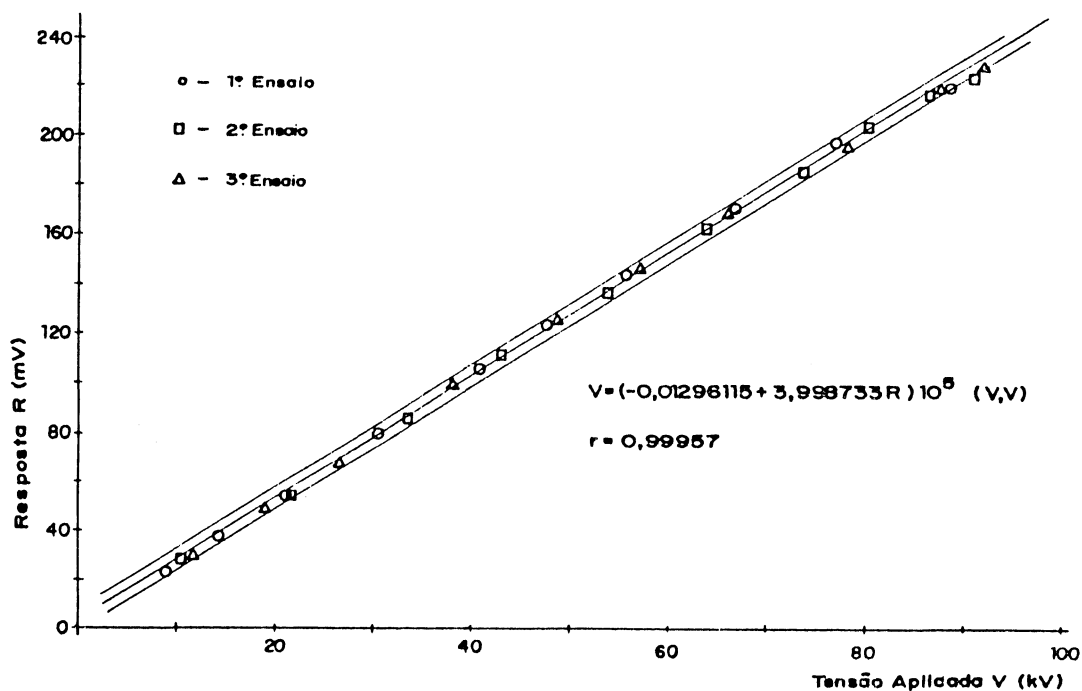


Fig. 3.2 - Resposta do transdutor em relação à tensão aplicada na quarta combinação.

Na figura 3.2, mostramos a curva da resposta R , em relação à tensão aplicada V , a qual se fez variar de zero a 92kV. Este tipo de montagem atende melhor a faixa de medição de alta tensão.

Nas figuras 3.3 e 3.4, mostramos a reprodução da onda na resposta R com relação à tensão aplicada V . O pequeno atraso no tempo de resposta com relação à tensão aplicada, mostrada na figura 3.3, é devido ao circuito eletrônico utilizado.

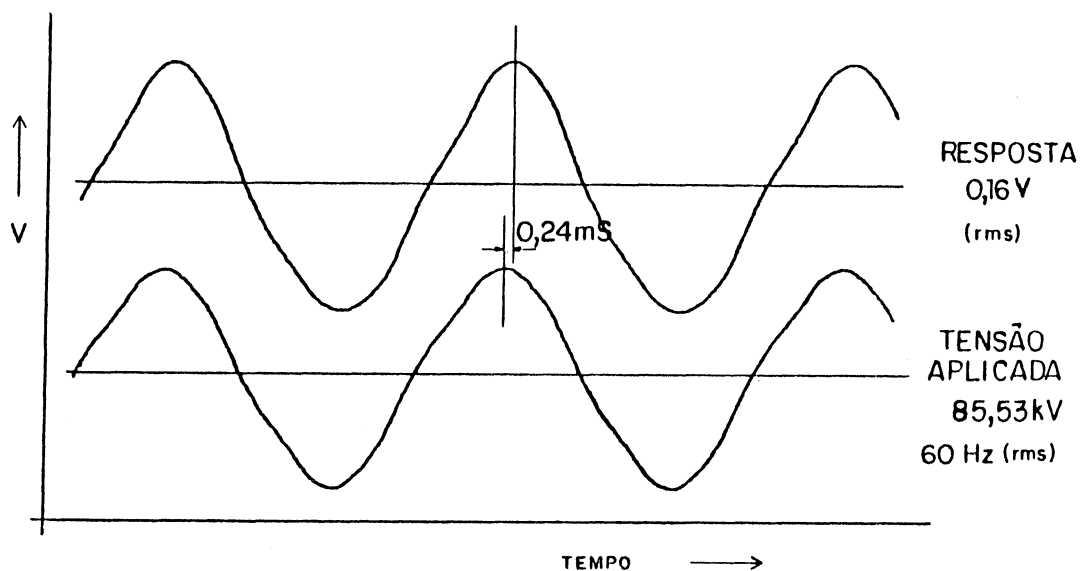


Fig. 3.3 - Oscillograma das formas de onda da resposta e da tensão aplicada.

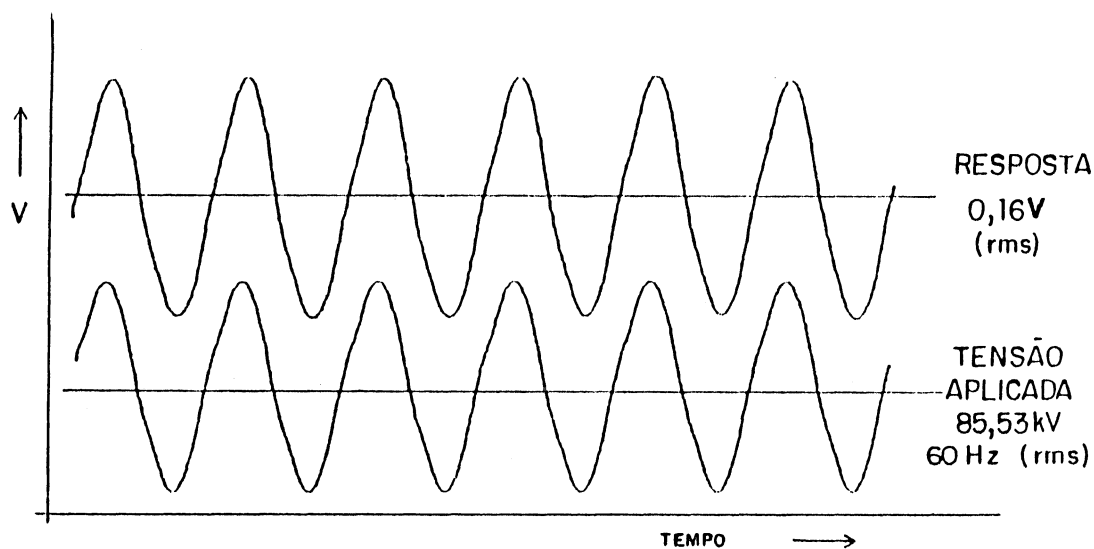


Fig. 3.4 - Oscillograma das formas de onda da resposta e da tensão aplicada.

Em geral, as medidas da resposta R e da tensão aplicada V estão elivadas de erros muito pequenos (<0,1%). A flutuação dos resultados mostrados nas figuras 3.1 e 3.2 pode ser explicada como devido ao processo de transdução do campo elétrico no nível de alta tensão para o sinal elétrico R no nível de terra.

Aplicando a análise de regressão sobre os dados de figura 3.2, verificamos que ajustes razoavelmente bons seriam aqueles da forma $V = AR^B$ e $V = A + BR$. Por questões de simplicidade, adotamos o linear, cujo resultado é, em unidades do SI:

$$V = (-0,0130 + 3,999R)10^5 \quad (V, V) \quad (3.1)$$

Aqui R desempenha o papel de variável controlada e V a variável prospectiva. Nesta situação, o coeficiente de correlação vale $r = 0,99957$.

Uma estimativa da região de precisão para V_0 , em um dado ponto R_0 , é dada pela expressão⁽¹⁸⁾:

$$V_0 = \hat{V} \pm t_{n-2, \alpha} \Delta \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(R_0 - \bar{R})^2}{S_{RR}}} \quad (3.2)$$

onde: \hat{V} é o valor dado por (3.1) para $R = R_0$; $t_{n-2, \alpha}$ é o parâmetro da distribuição t de Student; $n-2 = 28$ é o número de graus de liberdade; $\alpha = 95\%$ o nível de confiança; Δ^2 a variância residual; \bar{R} o valor médio das respostas; e $S_{RR} = \sum_{i=1}^{30} (R_i - \bar{R})^2$.

Na tabela 3.1, mostramos os resultados obtidos onde se constata que na região de previsão para V em termo do valor médio de V ($R = 0,13V$) é de $(50,7 \pm 1,7)kV$, ou seja, um desvio percentual de 3,4%, o qual será no momento admitido como a precisão nominal do transdutor.

Tabela 3.1 - Cálculo dos limites superior e inferior da região de previsão 95% do transdutor piezelétrico óptico.

(R)	(V)	(S)	(I)	(S-I)	(E)
0,020	0,087	0,085	0,049	0,035	26,4
0,030	0,107	0,125	0,089	0,035	18,4
0,040	0,147	0,165	0,129	0,035	11,9
0,050	0,187	0,204	0,170	0,035	9,3
0,060	0,227	0,244	0,210	0,035	7,6
0,070	0,267	0,284	0,250	0,034	6,4
0,080	0,307	0,324	0,290	0,034	5,6
0,090	0,347	0,364	0,330	0,034	4,9
0,100	0,387	0,404	0,370	0,034	4,4
0,110	0,427	0,444	0,410	0,034	4,0
0,120	0,467	0,484	0,450	0,034	3,6
0,130	0,507	0,524	0,490	0,034	3,3
0,140	0,547	0,564	0,530	0,034	3,1
0,150	0,587	0,604	0,570	0,034	2,9
0,160	0,627	0,644	0,610	0,034	2,7
0,170	0,667	0,684	0,650	0,034	2,6
0,180	0,707	0,724	0,690	0,034	2,4
0,190	0,747	0,764	0,730	0,034	2,3
0,200	0,787	0,804	0,769	0,035	2,2
0,210	0,827	0,844	0,809	0,035	2,1

onde:

R - Variável controlada (V);

V - Variável prospectiva ($10^{-5}V$);

S - Limite superior de variável prospectiva ($10^{-5}V$);

I - Limite inferior de variável prospectiva ($10^{-5}V$);

E - desvio percentual $(\frac{S - I}{2V})100$.

CONCLUSÕES

Observa-se, pelo resultado dos experimentos, que é viável a construção de transformador de potencial, utilizando princípios não convencionais, combinando o efeito piezoeletrico inverso com a interferometria óptica, em particular para uso em laboratório.

A obtenção de resultados confiáveis está condicionada à utilização de laser com intensidade luminosa estabilizada; e compensação de dilatação térmica de todos os componentes do transdutor, de modo a manter invariável o espaçamento entre os dois semi-espelhos, dentro da faixa de variação de temperatura de trabalho.

Destacamos a eficiência do método utilizado neste trabalho, referente à calibração para compensação de dilatação térmica no transdutor, para manter fixo o espaçamento entre os dois semi-espelhos do interferômetro. A utilização deste método dispensa o conhecimento exato dos coeficientes de dilatação térmica dos componentes utilizados, vis-à-vis o cálculo do espaçamento com a exatidão requerida e à impossibilidade experimental da medida deste com métodos convencionais.

A utilização de parafusos com passo menor, além de facilitar a regulagem do espaçamento, deixará o transdutor mais estável perante as vibrações mecânicas.

A utilização de metais com baixo coeficiente de dilatação térmica para a construção da base, também melhorará a estabilidade do transdutor.

Uma mudança brusca da temperatura ambiente pode causar, momentaneamente, expansões desiguais nas peças que compõem o

transdutor e, conseqüentemente, um aumento no erro de transdução até que as expansões fiquem estabilizadas.

O resultado do experimento para determinação da frequência de ressonância e anti-ressonância na PZT, mostra que estes valores estão longe da frequência de trabalho (60Hz), de modo que a sua interferência na resposta é desprezível.

As combinações das polarizações das cerâmicas PZT no transdutor piezelétrico óptico permitirão abranger uma vasta faixa de tensões alternadas.

O formato da base metálica também permitirá modificar a sensibilidade do transdutor, pela alteração da distribuição do campo elétrico.

Embora tenhamos estimado a precisão do transdutor em aproximadamente 3,4%, esta pode ser substancialmente melhorada pela introdução de refinamentos tais como, melhor qualidade das cerâmicas, metais com baixo coeficiente de dilatação térmica, resposta térmica conveniente dos metais e estabilização da intensidade do laser.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento do transdutor piezelétrico óptico, descrito neste trabalho, não houve preocupação, em esgotar o assunto. Na realidade surgiram diversas ideias, citadas a seguir, que poderão ser desenvolvidas no futuro, visando o aprimoramento do transdutor e o desenvolvimento de equipamentos alternativos.

1 - Desenvolver uma caixa protetora, utilizando material dielétrico, para evitar que poeiras ou objetos estranhos caiam sobre o transdutor, e atenuar a variação brusca de temperatura no transdutor causada pela variação de temperatura ambiente, sem afetar proeminentemente a distribuição do campo elétrico.

2 - Utilizar fibra-óptica como meio de transporte de sinal óptico. A utilização de fibra-óptica tem as seguintes vantagens: 1. A distância entre o laser e o transdutor e entre o transdutor e o fotodiodo pode ser estendida até quilômetros sem perda da sensibilidade; 2. Como o sinal óptico é imune às influências de campos eletromagnéticos, a resposta é mais precisa com relação aos processos convencionais; 3. O laser e os componentes eletrônicos podem ficar na sala de controle, facilitando seu manejo e reduzindo as variações de temperatura.

3 - Desenvolver sistema de medição de tensão trifásica para utilização em sistema de distribuição e transmissão em alta tensão.

4 - Desenvolver TC (Transformador de Corrente) ópticos para obter sinais de corrente, que quando combinando com os dos TP ópticos, resultarão em dados completos para a medição, proteção e controle de sistemas elétricos em alta tensão.

5 - Utilizar laser infra-vermelho no lugar de He-Ne. Este feixe, tendo comprimento de onda maior, possibilita uma variação maior no espaçamento entre semi-espelhos para um período de curva de Airy e, conseqüentemente, um aumento na faixa de medição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. HEBNER, R.E. et alii. Optical methods of electrical measurement at high voltage levels. Proceeding of the IEEE, v.85, n.11, p.1524-1548, nov. 1977.
2. MOUTON, L. et alii. Non conventional current and voltage transformers. Electra, n.59, p.91-122, Jul. 1978.
3. THIONE, L. Applicazione dei sistemi a fibre ottiche per la trasmissione di segnali di misura e controllo nei laboratori e negli impianti di alta tensione. CESI, Milano, 1979. (CESI, pub. 79/07).
4. HARTMAN, H. Current and voltage transformers for 750kV. The Brown Boveri Review, v.51, n.1/2, p.84-92, Jan/feb. 1964.
5. MITSUI, T. et alii. Development of fiber-optic voltage sensors and magnetic-field sensors. IEEE Transactions on Power Delivery, v.PWRD-2, n.1, p.87-93, Jan.1987.
6. BRAMBILLA, R., STRINI, G. The measurement of electric fields by means of a mirror electro-optical cell. IN: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING. 5. Braunschweig, 1987.
7. ROGERS, A.J. Optical measurement of current and voltage on power systems. IEE B, v.2, n.4, p.120-124, aug. 1979.
8. BRAUN, A., ZIRPEL, R. Opto-electronic transmission system for high-voltage measurements. IN: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING, 3. Milano, 1979.
9. MILLS, A.A., HURST, A.W. A piezoceramic fine-movement control. J. Phys. E. Sci. Instrum., v.14, p.295-296, 1981.
10. SNYDER, G.W., LOZANNE, A.L. Concentric tube scanning tunneling microscope. Rev. Sci. Instrum., v.59, n.4, p.541-544, apr. 1988.
11. STONE, J., STULZ, L.W. Pigtailed high-finesse tunable fibre Fabry-Perot interferometers with large, medium and small free spectral ranges. Electronics Letters, v.25, n.15, p.781-783, 1987.
12. HE DI, LI JINGDE. Large displacement piezoelectric modulator. Ferroelectrics Letters, v.6, n.1, p.7-14, 1986.

13. KAWAMURA, K. et alii. Development of a high-voltage sensor using a piezoelectric transducer and a strain gage. IEEE trans. Instrum. Measurement, v.37, n.4, p.564-568, dec. 1988.
14. MATTIAT, O.E. Ultrasonic transducer materials. New York, Plenum, 1971.
15. IRE standards on piezoelectrics crystals: Measurements of piezoelectric ceramics, 1961. Proc. of the IRE, p.1161-1169, 1961.
16. ASTM, PUB. DBM-1-23. Select Powder Diffraction Data for Minerals. p.589. 1972.
17. HERNANDEZ, G. Fabry-Perot Interferometers. Cambridge, University Press, 1988.
18. COSTA NETO, P.L.O. Estatística. São Paulo, Edgar Blucher, p.178, 1977.
19. TAREEV, B.M., et alii. Electrical and radio engineering materials. MIR, Moscow, p.271, 1980.