

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO  
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

**CONVERSOR DE ENERGIA LUMINOSA EM ELÉTRICA  
PARA DISPOSITIVOS DE BAIXA POTÊNCIA UTILIZANDO  
O EFEITO PIROELÉTRICO DO POLÍMERO PVDF**

**VIKTOR OSWALDO CÁRDENAS CONCHA**

**ORIENTADOR: PROF. DR. JOÃO SINÉZIO DE CARVALHO CAMPOS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA À FACULDADE DE ENGENHARIA  
QUÍMICA COMO PARTE DOS REQUISITOS EXIGIDOS PARA A OBTENÇÃO DO  
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA.**

CAMPINAS – SÃO PAULO  
DEZEMBRO DE 2004

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL  
SEÇÃO CIRCULANTE

68.411.5.002

UNIDADE	BC
CHAMADA	T/Unicamp C178c
V	EX
TOMBO BC/	64295
PROC.	16-P-00066-05
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	11,00
DATA	13/06/05
Nº CPD	

3, bibid: 353131

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

C178c	<p>Cárdenas Concha, Viktor Oswaldo</p> <p>Conversor de energia luminosa em elétrica para dispositivos de baixa potência utilizando o efeito piroelétrico do polímero PVDF / Viktor Oswaldo Cárdenas Concha.-- Campinas, SP: [s.n.], 2004</p> <p>Orientador: João Sinézio de Carvalho Campos Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.</p> <p>1. Detectores piroelétricos. 2. Polímeros – Propriedades elétricas. I. Campos, João Sinézio de Carvalho. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.</p>
-------	---

RMS

Titulo em Inglês: Luminous energy converter into electric devices by PVDF pyroelectric effect

Palavras-chave em Inglês: Pyroelectric detectors e Properties electric - Polymers

Área de concentração: Ciência e Tecnologia de Materiais

Titulação: Mestre em Engenharia Química

Banca examinadora: Rubens Maciel Filho e Celso Xavier Cardoso

Data da defesa: 13/12/2004

Dissertação de Mestrado defendida por Viktor Oswaldo Cárdenas Concha, e aprovada no dia 13/12/2004 pela banca examinadora constituída pelos doutores:



---

Prof. Dr. João Sinézio de Carvalho Campos (orientador)



---

Prof. Dr. Celso Xavier Cardoso



---

Prof. Dr. Rubens Maciel Filho

Este exemplar corresponde à versão final da Dissertação de Mestrado em  
Engenharia Química.



---

Prof. Dr. João Sinézio de Carvalho Campos  
Orientador

*A meus pais Victor e Dina, pela educação, os princípios e pela confiança depositada, meu muito obrigado. A meus irmãos Sheyla e Jeff, minha família em geral que desde tão longe me deram apoio e forças para poder realizar meus objetivos, obrigado!!!!*

## AGRADECIMENTOS

Ao professor João Sinézio de Carvalho Campos pela confiança, apoio e ajuda na realização deste trabalho.

A Cibelem muito obrigado, por me ajudar, incentivar, pelo carinho, amor e todas as coisas boas que aprendi com ela e continuo aprendendo, muito obrigado.

Muito obrigado a meu primo Juan, que me ajudou e me motivou a vir ao Brasil e me incentivo a chegar até aqui, valeu!!!

Um agradecimento especial a duas pessoas, Gilvan e Leandro, dois grandes amigos, espero continuar recebendo sua amizade.

A faculdade de Engenharia Química da UNICAMP, em especial ao Departamento de Tecnologia de Polímeros pela oportunidade profissional e colaboração para a realização deste trabalho.

Aos professores e funcionários do DTP.

Ao LUC (Laboratório de uso comum), pelo empréstimo de equipamentos.

Ao Laboratório de Óptica da Faculdade de Física, professora Lucila Cescato.

Aos técnicos do barracão Alexandre, Daniel e o pessoal todo, obrigado.

Meu muito obrigado a Junior, Romi e Virgínia, pela ajuda e amizade, obrigado mesmo!!!!

Aos meus grandes amigos que mesmo não estando perto fisicamente, estiveram sempre me incentivando e se preocupando com minha pessoa, obrigado.

Aos meus colegas do departamento pela amizade.

Ao CNPq pela bolsa de estudos concedida.

*“Descobri como é bom chegar quando se tem paciência, e para chegar onde quer que seja, aprendi que não é preciso dominar a força, mas a razão. É preciso antes de mais nada, querer”*

*Amyr Klink*

## RESUMO

O polímero polifluoreto de vinilideno (PVDF, PVF<sub>2</sub>) há décadas é conhecido como um material que possui diversas propriedades (óptica, mecânica e elétrica), se destacando dentre os polímeros, pois raramente se tem um polímero com tantas propriedades. Apesar de conhecido, pouco se tem explorado suas aplicações. Necessitando muito estudo no sentido de dominar e ampliar suas aplicações tecno-científicas. Este trabalho visa mostrar uma de suas aplicações em converter sinais luminosos (proveniente de fonte de luz branca ou sol) em sinais elétricos, podendo assim ser aplicado nos vários campos de sensores e/ou conversores de energia. Como sensores pode-se citar aplicações em detectores de intrusos, controladores de luminosidade de ambientes. Como conversor, convertendo energia luminosa em eletricidade (geradores). Este último caso, especialmente (até o momento) em nano geradores, podendo preencher necessidades onde a massa inercial a ser movimentada deve ser pequena, por exemplo, sondas espaciais, nanomotores e painéis conversores em aplicações espaciais. Dada a importância deste domínio, neste trabalho são apresentados resultados sobre os sinais elétricos gerados em uma fina membrana de PVDF devido ao efeito piroelétrico, causados por fótons de luz branca incidente sobre a membrana de PVDF. O dispositivo montado é basicamente composto por uma membrana de PVDF, um “chopper” (modulador mecânico de luz), um amplificador-casador de impedância e um osciloscópio para monitorar e medir os sinais elétricos gerados. O estudo foi realizado em função dos parâmetros: distância detector-fonte de luz, intensidade (potência) de luz; frequência de modulação do “chopper” e área de iluminação no sensor. Os resultados mostram que a sensibilidade do sensor é de 8,3 mV/lux; a melhor relação sinal/frequência é obtida quando o “chopper” opera em de 10 Hz; quando maior a potência da fonte de luz que chega à superfície do sensor maior é o sinal elétrico gerado; tal dependência se observou em função a área iluminada do sensor, como também da proximidade da fonte de luz (mais próximo mais intenso é o sinal elétrico gerado). Além da montagem, princípios de funcionamento e caracterização do sensor e dispositivo, foi realizado o planejamento fatorial no sentido de otimizar os parâmetros e análises dos resultados encontrados.

Palavras-chave: Polifluoreto de vinilideno, conversor de energia, efeito piroelétrico.

## ABSTRACT

The poly(vinylidene fluoride) (PVDF, PVF2) is known as a material that possesses important properties between polymer families (optical, mechanics and electric), in spite of well-known, its properties hasn't been exploring. However, it is necessary a lot of study in the sense of dominate and to enlarge its tecno-scientific applications. This work seeks to show one of the PVDF applications in converting luminous signs (coming of white light source or sun) in electric signs, could be applied in the several fields of sensor or energy converters. As sensor, it can make appointment applications in intruders detectors, atmospheres brightness controllers and many other. As converter, it transforms luminous energy into electricity (generators). In this last case, especially (until the moment) in nano generators, where the inertial mass to be moved should be small, for example space probes, nano motors and panels converters in space applications. Given the importance of this domain, in this work is presented results on the electric signs generated in a fine membrane of PVDF due to the piroelectric effect caused by photons of white light incident on the PVDF membrane. The device design is basically composed by a PVDF membrane, a light mechanical chopper, a matching amplifier of impedance and an oscilloscope monitoring and measuring the generated electric signs. The study is accomplished in function of the parameters: distance light detecting-source, light intensity (potency), chopper modulation frequency and illumination area in the sensor. The results show as, for the device designed used in this work, the sensor sensibility is 8 mV/lux; the best relationship signal/frequency is when the chopper operates in 10 Hz; for larger potency of the light source that arrives to the bigger sensor surface is the generated electric sign, such dependence was also observed in relation the illuminated area of the sensor, as well as of the proximity of the light source (closer more intense is the generated electric signal). The same time these experiments, beyond the device, operation and sensor characterization, an factorial design was carried out to optimizer the parameters and analyses of the found results.

Key-words: Poly vinilidene fluoride, energy convertes, pyroelectric effect.

## SUMÁRIO

	Pág.
RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	ix
SUMÁRIO.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE TABELAS.....	xv
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xvi
I. INTRODUÇÃO.....	1
II. OBJETIVO.....	3
III. JUSTIFICATIVA.....	4
IV. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
4.1. Detectores.....	5
4.2. Sensores Térmicos.....	7
4.3. Detectores Piroelétricos.....	7
4.3.1. Efeito Piroelétrico.....	7
4.3.2. Sensor Piroelétrico.....	7
4.4. POLI (FLUORETO DE VINILIDENO).....	8
4.4.1. Introdução.....	8
4.4.2. Estrutura.....	8
4.4.3. Fases do PVDF.....	11
4.4.4. Interconversão das formas do PVDF.....	16
4.5. Ferroeletricidade.....	17
4.5.1. Propriedades dos Ferroelétricos.....	18
4.5.2. Piezoeletricidade e Piroeletricidade.....	19
4.5.3. Aplicações dos filmes piezoelétricos.....	23
4.6. Comparação entre materiais piroelétricos.....	24
4.7. Vantagens e Desvantagens do PVDF em relação aos materiais tradicionais, cerâmicas e cristais.....	25
4.8. Artigos e Patentes envolvendo o PVDF.....	25
V. MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
5.1. Aparato Experimental.....	27
5.1.1. Sensor Piroelétrico.....	28

5.1.2. Fontes de Radiação.....	30
5.1.3. Modulador Mecânico (“chopper”).....	30
5.1.4. Circuitos Pré-amplificador e Amplificador.....	32
5.1.5. Sistema de Leitura.....	34
5.2. Metodologia Experimental e Estatística.....	34
VI. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	39
6.1. Sinal piroelétrico em função da frequência do “chopper” (Hz) e das diferentes potências incidentes (watts).....	39
6.2. Sinal piroelétrico em função da distância (cm) e das diferentes potências incidentes..	41
6.3. Sinal piroelétrico em função da área iluminada do sensor (cm <sup>2</sup> ) e das diferentes potências incidentes (watts).....	42
6.4. Sinal piroelétrico em função das diferentes potências incidentes no sensor (watts)....	43
6.5. Análise Estatístico.....	44
6.5.1. Primeiro Planejamento.....	44
6.5.2. Segundo Planejamento.....	48
VII. CONCLUSÕES.....	54
VIII. SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS.....	56
IX. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57
ANEXOS.....	61

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 – Efeito fotoelétrico (a) e térmico (b) mostrando o aumento na energia do elétron ou a elevação da temperatura do sensor devido à radiação absorvida.....	6
Figura 2 – Fatia de material piezoelétrico juntamente com seus contatos metálicos (eletrodos).....	8
Figura 3 – Unidade básica do monômero do PVDF.....	9
Figura 4 – Diagrama esquemático de um esferulito mostrando a estrutura lamelar com segmento normal à lamela.....	10
Figura 5 – (a) Possíveis conformações estáveis para as ligações carbono-carbono e em (b) as conformações estáveis das cadeias de PVDF.....	11
Figura 6 – Célula unitária do PVDF forma II, (a) estrutura determinada por BACHMAN e LANDO e (b) projeção no plano ab e as setas indicam os momentos de dipolo perpendicular ao eixo da cadeia.....	12
Figura 7 – PVDF fase $\beta$ em (a) célula unitária e (b) projeção no plano ab, com as setas indicando a orientação dos dipolos na cadeia.....	13
Figura 8 – Fase $\gamma$ do PVDF em (a) célula unitária segundo TAKAHASHI e TADOKORO e (b) projeção no plano ac com as setas indicando a direção dos dipolos na célula unitária.....	14
Figura 9 – Célula unitária da fase $\delta$ do PVDF em (a) projeção nos planos “ab” e “bc” segundo BACHMAN <i>et. al.</i> (1980) e (b) projeção no plano “ab” com as setas indicando a direção dos momentos de dipolos perpendiculares ao eixo da cadeia.....	15
Figura 10 – Diagrama esquemático mostrando as conversões entre as fases do PVDF (T, temperatura; P, pressão; E, campo elétrico) (DAVIS <i>et. al.</i> , 1978).....	16
Figura 11 - Ciclo de histerese, em unidades arbitrárias, típico de um material ferroelétrico. $P_r$ é a polarização remanescente e $E_c$ é o campo coercitivo.....	18
Figura 12 – Representação esquemática de material ferroelétrico polarizado.....	19
Figura 13 – Efeito piezoelétrico.....	20
Figura 14 – Representação esquemática de uma molécula dipolar.....	21
Figura 15 – Representação esquemática de um cristal.....	21
Figura 16 – Representação esquemática de um cristal com centro elétrico deslocado.....	21

Figura 17 – Dependência da polarização ferroelétrica pela temperatura.....	23
Figura 18 – Diagrama do aparato experimental.....	27
Figura 19 – Aparato experimental.....	27
Figura 20 – Diagrama do sensor piroelétrico em explosão.....	28
Figura 21 – Diagrama do sensor piroelétrico.....	29
Figura 22 – Sensor piroelétrico.....	29
Figura 23 – Sensor piroelétrico enegrecido.....	29
Figura 24 – Disco de Alumínio.....	31
Figura 25 – Modulador mecânico, “chopper”, vista frontal do disco mais fonte de tensão e motor.....	31
Figura 26 – Modulador mecânico utilizado.....	32
Figura 27 – esquema elétrico do circuito pré-amplificador.....	33
Figura 28 – Esquema elétrico do circuito amplificador.....	34
Figura 29 – Tensão piroelétrica (mV) em função da frequência do “chopper” (Hz), com distância constante (6 cm), área de incidência do sensor constante (0,9 cm <sup>2</sup> ), para valores de 23, 55 e 99 watts.....	40
Figura 30 – Tensão piroelétrica (mV) em função da distância (cm), com frequência do “chopper” constante (10 Hz), área de incidência do sensor constante (0,9 cm <sup>2</sup> ), para valores de 23, 55 e 99 watts.....	41
Figura 31 – Tensão piroelétrica (mV) em função da área iluminada do sensor (cm <sup>2</sup> ), com frequência do “chopper” constante (10 Hz) e distância constante (6 cm), para valores de 23, 55 e 99 watts.....	42
Figura 32 – Tensão Piroelétrica (mV), em função da potência (watts) alimentada na fonte, com frequência constante (10 Hz), distância constante (6 cm) e área atingida do sensor constante em 0,64 cm <sup>2</sup> .....	43
Figura 33 – Gráfico de Pareto primeiro planejamento.....	44
Figura 34 – Superfície de resposta tensão em função da distância vs. área .....	46
Figura 35 – Superfície de resposta tensão em função da frequência vs. área .....	47
Figura 36 – Superfície de resposta tensão em função da frequência vs. distância.....	47
Figura 37 – Gráfico de Pareto segundo experimento.....	48
Figura 38 – Superfície de resposta tensão em função da área vs. frequência.....	50
Figura 39 – Superfície de resposta tensão em função da frequência vs. distância.....	51

Figura 40 – Superfície de resposta tensão em função da intensidade vs. frequência...	51
Figura 41 – Superfície de resposta tensão em função da área vs. distância.....	52
Figura 42 – Superfície de resposta tensão em função da área vs. intensidade.....	52
Figura 43 – Superfície de resposta tensão em função da distância vs. intensidade.....	53

**ÍNDICE DE TABELAS**

	Pág.
Tabela 1 – Aplicações dos filmes piezoelétricos.....	23
Tabela 2 – Propriedades dos materiais mais utilizados como detectores piroelétricos.....	24
Tabela 3 – Níveis de operação do planejamento $2^3$ .....	36
Tabela 4 – Matriz do planejamento experimental $2^3$ e resposta (tensão pico a pico).....	37
Tabela 5 – Níveis de operação do planejamento $2^4$ .....	37
Tabela 6 – Matriz do planejamento experimental $2^4$ e resposta (tensão pico a pico).....	38
Tabela 7 – Coeficientes de Regressão primeiro planejamento.....	45
Tabela 8 – Análise de variância (ANOVA) primeiro planejamento.....	45
Tabela 9 – Coeficientes de Regressão segundo planejamento.....	49
Tabela 10 – Análise de variância (ANOVA) segundo planejamento.....	49

## LISTA DE ABREVIATURAS

$\alpha$	alfa
$\beta$	beta
$\gamma$	delta
$\delta$	gama
$\Omega$	Ohms
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
$\mu\text{m}$	Micrometros ( $10^{-6}$ )
$\Delta T$	Variação de Temperatura
$\text{Å}$	Angstroms
A.C.	Corrente alternada
$\text{BaTiO}_3$	Titanato de Bário
$\text{CF}_2$	Fluoreto de carbono
D.C.	Corrente continua
$d_{ij}$	Coefficientes piezoelétricos
$dP/dT$	Polarização em função da variação da temperatura
E	Campo elétrico (V/m)
$E(t)$	Campo elétrico em função do tempo
$E_c$	Campo coercitivo
F	Força mecânica
$\text{g/cm}^3$	Massa específica
$\text{g/mol}$	Grama por mol
$\text{gH}_2\text{O/gPVDF}$	Gramas de água por gramas de Polifluoreto de vinilideno
Hz	Hertz
$J(t)$	Densidade de Corrente
$\kappa\Omega$	Kiloohms
m	Metros
Mv/cm	Milivolt por centímetro

$p$	Coeficiente Piroelétrico
$P$	Polarização elétrica
$P$	Pressão
$P_r$	Polarização remanescente
PVDF	Polifluoreto de Vinilideno
PZT	Titanato de Zirconato de Chumbo
$R_L$	Resistores de carga
$s$	Segundos
$T$	Temperatura
$t$	Tempo
$T_g$	Transição Vitrea
TGS	Sulfato de triglicina
$V$	Tensão
$V/\mu\text{m}$	Tensão por micrometro.

## I. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas os polímeros vêm substituindo os materiais tradicionais nas suas diversas atividades. Inicialmente foram utilizados como isolantes elétricos na área da eletricidade. Entretanto, com a síntese de novos compostos poliméricos, os polímeros começaram a ser utilizados como elementos ativos na construção dos mais diversos dispositivos. Um dos polímeros que tem recebido significativa atenção é o polifluoreto de vinilideno (polyvinylidene fluoride), também conhecido como PVDF ou PVF<sub>2</sub>. Esse destaque do PVDF pode ser verificado pelo enorme número de trabalhos e patentes desenvolvidos e publicados, mostrando suas inúmeras aplicações.

O interesse por este polímero começou quando suas propriedades piezoelétricas começaram a ser estudadas, verificando-se que o PVDF tornava-se altamente piezoelétrico, após o estiramento mecânico e submetido à ação de campo elétrico, KAWAI (1969). Posteriormente foi descoberta sua atividade piroelétrica por BERGMAM *et al.*, (1971) e NAKAMURA e WADA (1971). Cabe ressaltar que o PVDF não é um material polimérico sintetizado recentemente; já era conhecido desde a década de 40, como um polímero de alta constante dielétrica e diversas fases cristalinas (FURUKAWA, 1989).

O PVDF é um material de particular interesse científico e tecnológico, por apresentar propriedades ferroelétricas (piezoeletricidade e piroeletricidade), o que potencializa em aplicações no campo de transdutores (interconversões de energia elétrica, mecânica e térmica). Os quais podem ser destacados com sensores (SESSLER, 1987 e WANG, 1988). Além de tais qualidades, conseguem combinar as características de plástico com as de um elemento piezoelétrico e piroelétrico, apresentando excelente combinação de processabilidade, resistência mecânica, resistência a agentes químicos, leveza, moldabilidade, baixo custo de produção e ser quimicamente inerte (SESSLER, 1981; ATOCHEM, 2002).

Todas essas propriedades fazem com que sua produção seja em larga escala, abaixando os custos, conferindo-lhe algumas vantagens sobre os transdutores cerâmicos convencionais. Enquanto as cerâmicas são quebradiças, rígidas e densas, o PVDF é flexível, de baixa densidade ( $\approx 1,9$ ) e facilmente produzido na forma de filmes finos. São essas propriedades que o qualificam para as inúmeras aplicações tecnológicas como

transdutores eletro-mecânicos e eletro-térmicos (GALLETTI *et al.* 1988; LOVINGER 1982; SESSLER e WEST, 1987). Também vem sendo utilizado em revestimentos para evitar ataque de produtos corrosivos e recobrimento de cabos condutores de eletricidade usados em ambientes muito agressivos (ATOCHEM, 2002). Mostra-se assim que o PVDF não é somente um material com estrutura quimicamente estável, mas também um polímero funcional executando transformações de energia.

Os avanços para o entendimento do PVDF têm sido descritos na literatura (BROADHURST *et al.*, 1978; FURUKAWA *et al.* 1980; LOVINGER, 1982). No entanto, tiveram que se passar aproximadamente dez anos para que, na década de 80, ser reconhecido como um material ferroelétrico (KAWAI, 1969).

Embora o PVDF tenha sido muito investigado nas últimas três décadas, existem ainda aspectos que merecem uma maior investigação; como caracterizar a dependência da polarização ferroelétrica com o campo, que é fundamental para o entendimento básico do polímero com a finalidade de otimizar sua atividade ferroelétrica (BROADHURST e DAVIS, 1981; JIMBO *et al.*, 1984).

Neste sentido o presente trabalho visa dar continuidade a pesquisas realizadas por SINÉZIO e FURLAN, 1997, com vistas a avaliar a atuação do PVDF como transdutor na conversão de luz branca incidente e o sinal elétrico por ele gerado, com o objetivo de conhecer a tecnologia envolvida neste campo e ampliar suas aplicações, tanto aquelas voltadas para sensores como na possibilidade de pequenos geradores de energia. Mostramos a montagem de um dispositivo composto basicamente por um transdutor piroelétrico de PVDF, um amplificador de tensão, um “chopper” (modulador mecânico), uma fonte de luz e um osciloscópio. Com este dispositivo analisam-se os sinais elétricos gerados no PVDF devido à luz que sobre ele incide e avaliam-se os parâmetros: área iluminada do transdutor, frequência do “chopper”, distância entre fonte e transdutor.

## II. OBJETIVOS

- Montagem e caracterização de transdutores utilizando a propriedade piroelétrica do polímero polifluoreto de vinilideno (PVDF);
- Ampliar conhecimentos sobre transdutores construídos com polímeros;
- Possibilidade de construção de geradores de energia elétrica a partir de luz branca (artificial, sol) a partir do efeito piroelétrico no PVDF;
- Mostrar a influencia dos parâmetros (intensidade de luz; distância fonte-transdutor; frequência do modulador mecânico; área de iluminação do transdutor) na geração de sinais elétricos proveniente da caracterização piroelétrica do PVDF;
- Dar continuidade nesta linha de pesquisa iniciada por Sinézio 1980.

### III. JUSTIFICATIVA

- Importância técnico-científico do polímero PVDF, principalmente na área de tradutores (sensores, conversores de energia);
- Continuidade de linha de pesquisa;
- Possível alternativa para construção de geradores de energia (até o momento para baixa potencia).

## IV. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1. DETECTORES

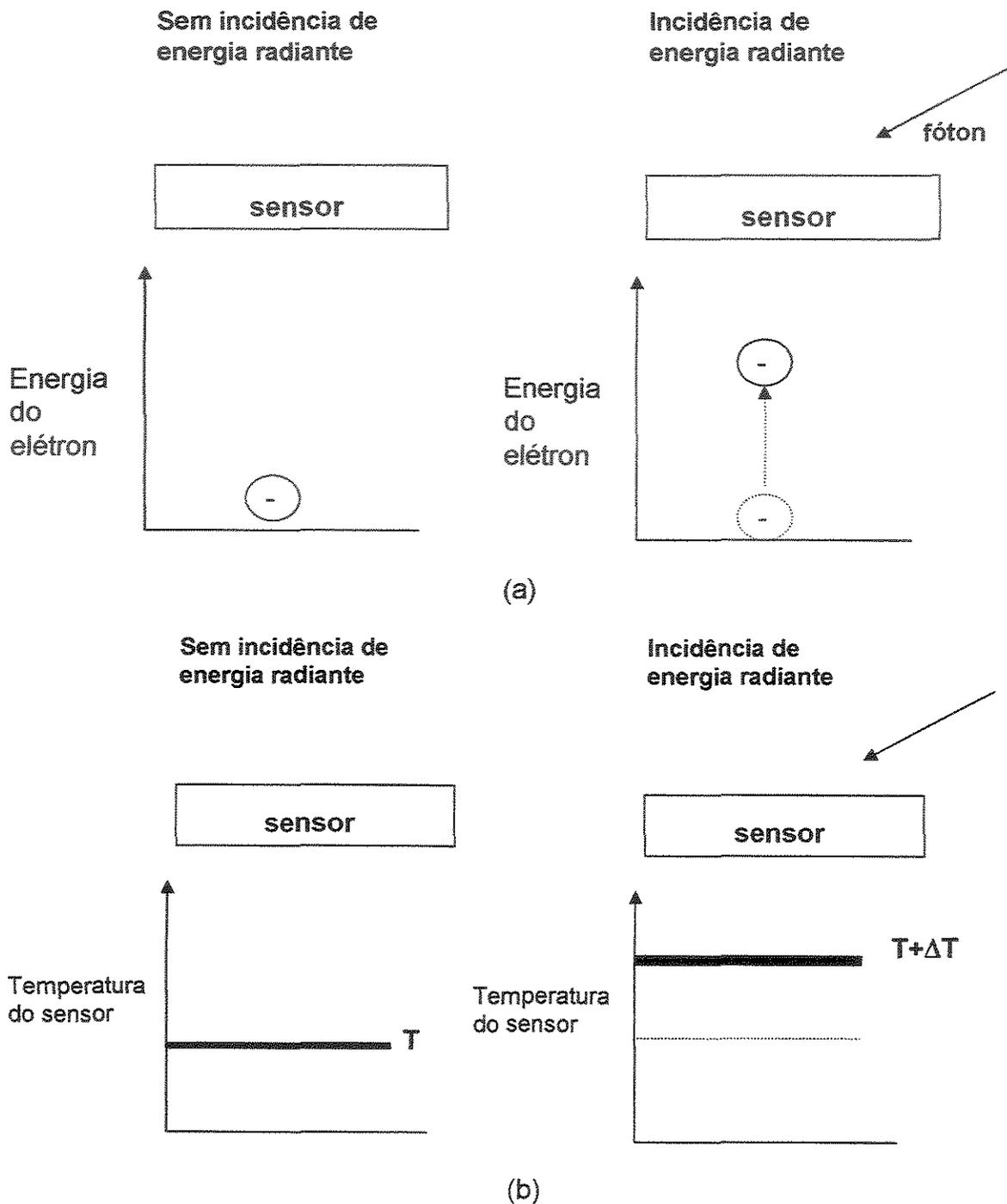
Detectores são dispositivos mecânicos, elétrico ou químico que identificam, registram ou indicam alterações nas variáveis na sua vizinhança, tais como pressão, temperatura, carga elétrica, radiação eletromagnética, radiação nuclear, partículas ou moléculas.

Sensores são dispositivos usados para detectar, medir ou gravar fenômenos físicos tais como calor, radiação etc., e que respondem transmitindo informações, transformando num sinal passível de interpretação, quer seja na forma de imagem, gráficos ou de tabelas (DOUGLAS, 2002).

Os detectores utilizados para medidas de radiação não-ionizante estão fundamentados no sinal elétrico gerado no sensor em função da energia radiante incidente (absorvida). Basicamente os efeitos envolvidos são os fotoelétricos e o térmico (HUDSON, 1969; GRUM, 1979).

A Figura 1.a refere-se ao efeito fotoelétrico, no qual quando a energia radiante incidente é absorvida pelo sensor, elétrons são excitados a um nível mais elevado de energia sendo até arrancados das camadas eletrônicas mais externas. E são estes elétrons em movimento os responsáveis pelos sinais elétricos observados.

A Figura 1.b refere-se ao efeito térmico, no qual o sensor ao absorver a energia radiante aumenta sua temperatura de  $T$  para  $T+\Delta T$ . Este aumento de temperatura causa o aparecimento de sinais elétricos.



**Figura 1** - Efeito fotoelétrico (a) e térmico (b) mostrando o aumento na energia do elétron ou a elevação da temperatura do sensor devido à radiação absorvida.

## 4.2. SENSORES TÉRMICOS

Materiais que possuem a propriedade de converter energia radiante em sinal elétrico são utilizados como sensores térmicos (HUDSON, 1969; MARCUS, 1982). O mecanismo primário de detecção envolve o aumento de temperatura do material devido à energia radiante absorvida. Em geral, sensores térmicos são espectralmente neutros, isto é, o aumento de temperatura não depende do comprimento de onda da radiação incidente.

Sensores térmicos são utilizados em situações onde se exige uma resposta espectralmente plana e tempos de resposta não muito rápidos. Entretanto, sensores piroelétricos além de apresentarem respostas espectralmente plana e neutra podem ter tempos de resposta rápidos ( $\sim 0,01$  s).

## 4.3. DETECTORES PIROELÉTRICOS

### 4.3.1. Efeito piroelétrico

Efeito piroelétrico (HUDSON, 1969; LAWSON, 1956; PUTLEY, 1970 e MARCUS, 1982) é definido como a carga elétrica gerada, como resposta a variações de temperatura.

### 4.3.2. Sensor piroelétrico

Consiste de um material piroelétrico com eletrodos de metal em suas superfícies, como ilustra a Figura 2.

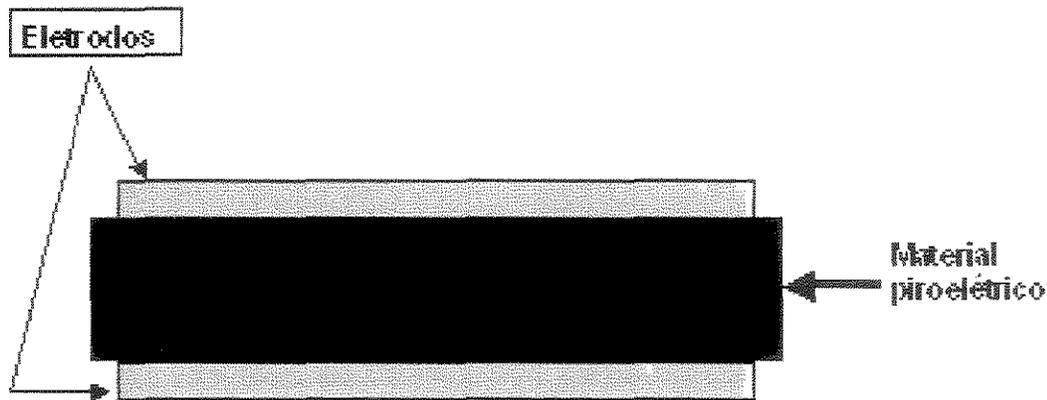


Figura 2 - Material piroelétrico juntamente com seus contatos metálicos (eletrodos).

O sensor piroelétrico prioritariamente responde a variações de temperatura e, portanto deve ser utilizado no modo A.C. Em outras palavras, o sensor somente detecta variações na potencia radiante incidente; desta forma se a fonte a ser estudada irradiar de forma continua, faz-se necessário uma modulação mecânica (“chopper”).

#### 4.4. POLIFLUORETO DE VINILIDENO (PVDF)

##### 4.4.1. Introdução

O polifluoreto de vinilideno é um polímero muito conhecido por suas propriedades características e de interesse científico-tecnológico, principalmente suas características ferroelétricas (FURUKAWA, 1986; SINÉZIO, 1990). Fazemos a seguir uma apresentação deste material, apresentando sua síntese, fases, e como potencializar suas propriedades.

##### 4.4.2. Estrutura

O PVDF pode ser produzido a partir da polimerização do radical livre de 1,1-difluoroeteno (WANG, 1988), um monômero sintetizado do acetileno ou cloreto de vinila via 1-cloro-1,1-difluoroeteno. É obtido na forma de grãos e pode ser processado na forma de filmes finos e em diversas espessuras.

Este polímero apresenta o monômero  $-(\text{CH}_2-\text{CF}_2)-$  como unidade básica, que se repete, dando origem as cadeias macromoleculares com ligações químicas do tipo cabeça-cabeça ("head-to-head"), as quais são da forma  $-\text{CH}_2(-\text{CF}_2-\text{CF}_2-)\text{CH}_2-$  ou cauda-cauda ("tail-to-tail")  $-\text{CF}_2-(\text{CH}_2-\text{CH}_2)-\text{CF}_2-$ . Seu peso molecular é da ordem de  $10^5$  g/mol, correspondendo a 2000 unidades de repetição.

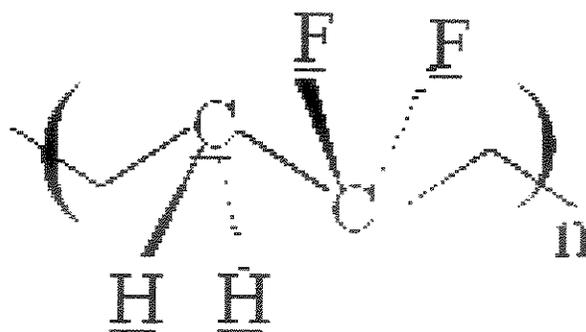
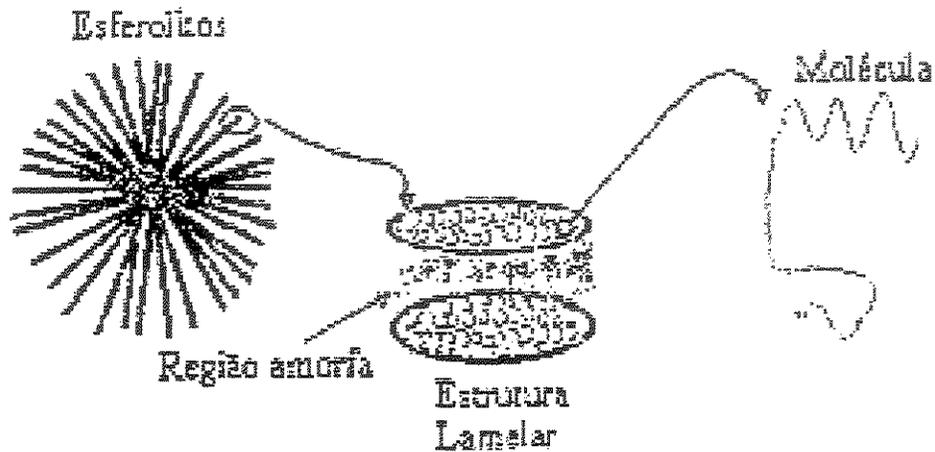


Figura 3 - Unidade básica do monômero do PVDF.

É um polímero semicristalino, ou seja, 50% cristalino e 50% amorfo e geralmente se cristaliza com estrutura esferulita. Os esferulitos são compostos por lamelas, que durante a cristalização crescem radialmente a partir de um centro comum. Estas lamelas têm tipicamente  $10^{-8}$ m de espessura e  $10^{-7}$ m de comprimento, dependendo das condições de cristalização.

O material amorfo tem a característica de um líquido superresfriado, e apresenta uma temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) de aproximadamente  $-50^\circ\text{C}$ . Sua estrutura lamelar esferulítica é mostrada na figura 4 (BROADHUST *et al.* 1978).

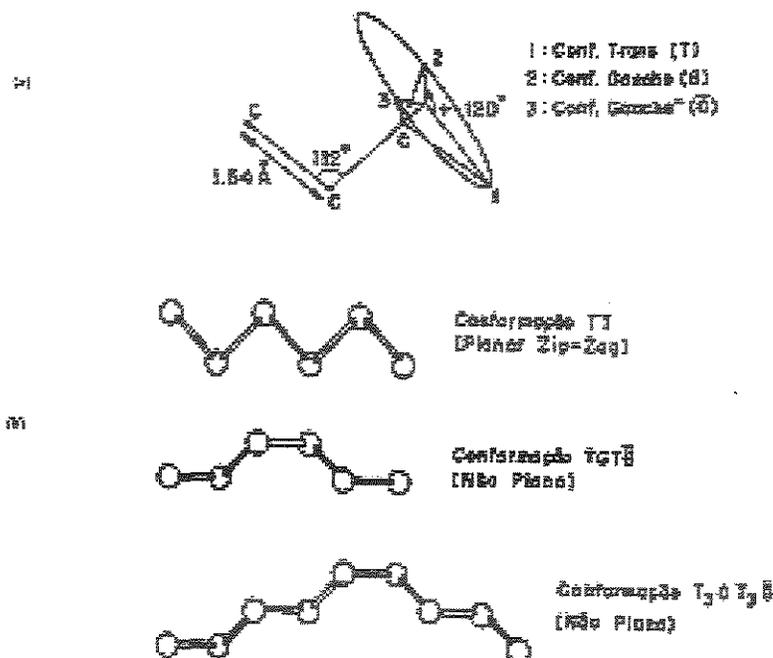
Devido à rotação através da ligação carbono-carbono, a conformação molecular na fase amorfa muda continuamente. Na ausência de campo elétrico externo, o momento de dipolo médio num grupo de moléculas na região amorfa é nulo, devido à orientação aleatória dos dipolos individuais. Já na fase cristalina, certas conformações moleculares são energeticamente favoráveis à orientação dipolar, podendo apresentar uma orientação preferencial.



**Figura 4** - Diagrama esquemático de um esferulito mostrando a estrutura lamelar com segmento normal à lamela.

As moléculas do PVDF podem apresentar diferentes conformações devido ao arranjo espacial dos átomos de carbono na cadeia, que podem ser mudados por rotações das cadeias químicas. As conformações que podem ocorrer das ligações carbono-carbono são: a conformação trans (T), a conformação gauche (G) e a conformação gauche' (G'), as quais estão representadas na figura 5a. As conformações estáveis para as cadeias de PVDF estão na figura 5b.

O PVDF pode apresentar quatro fases estruturais distintas, identificadas por  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  e  $\delta$ , a seguir apresentam-se às propriedades dessas estruturas assim como as técnicas utilizadas em suas caracterizações.



**Figura 5 -** (a) Possíveis conformações estáveis para as ligações carbono-carbono e em (b) as conformações estáveis das cadeias de PVDF.

#### 4.4.3. Fases do PVDF

##### a) Fase $\alpha$ (não polar)

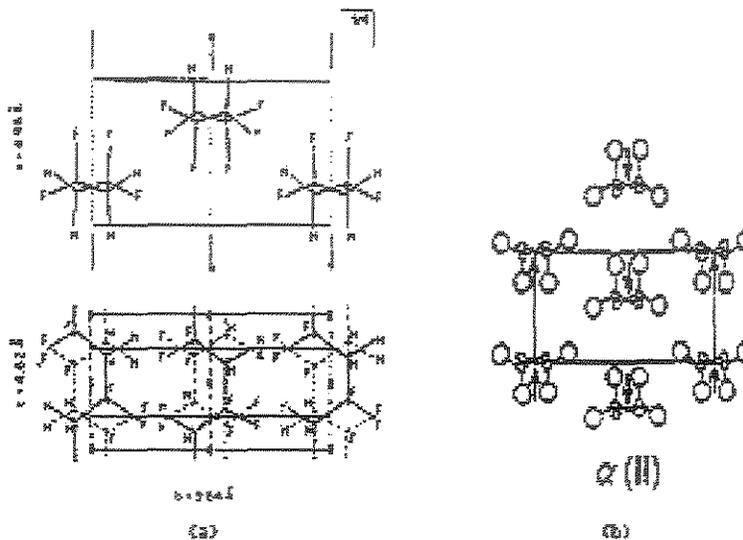
Esta é a fase mais comum do PVDF e é obtida normalmente pela cristalização do polímero a partir do estado fundido. A estrutura desta fase foi determinada por BACHMAN e LANDO (1980) e é mostrada na figura 6. Sua célula unitária é ortorrômbica e classificada no grupo espacial P2cm, com os parâmetros dados por:

$$a = 4,96 \text{ \AA}$$

$$B = 9,64 \text{ \AA}$$

$$c = 4,62 \text{ \AA}$$

A célula unitária é composta por duas cadeias cujos momentos de dipolo normais a c são antiparalelos, fazendo com que a fase  $\alpha$  seja não polar. A célula unitária apresenta uma densidade média cristalina de 1,92 e uma temperatura de fusão de 170°C (HASEGAWA *et al.*, 1972).



**Figura 6** - Célula unitária do PVDF forma II, (a) estrutura determinada por BACHMAN e LANDO e (b) projeção no plano  $ab$  e as setas indicam os momentos de dipolo perpendiculares ao eixo da cadeia.

A partir da fase  $\alpha$  pode-se obter as outras três fases, através de tratamentos mecânicos, térmicos e/ou elétricos adequados. Além da mudança de fase, mudança na orientação dos dipolos podem ocorrer sob campo elétrico. A mudança induzida pelo campo na orientação dipolar e na mudança de fase pode ocorrer pela rotação do flúor ao redor da ligação carbono-carbono e/ou por rotação dos segmentos moleculares ao redor do seu eixo.

### b) Fase $\beta$ (polar)

É considerada a mais importante por apresentar atividades piezoelétricas e piroelétricas elevadas, o que a torna extensivamente usada nas aplicações comerciais. Apresenta uma estrutura menos complicada que a fase  $\alpha$  e foi determinada por GALPERIM *et al.* (1965). A célula unitária da fase  $\beta$  representada na Figura 7 contém duas cadeias em simetria ortorrômbica com constante de rede HASEGAWA *et al.* (1972):

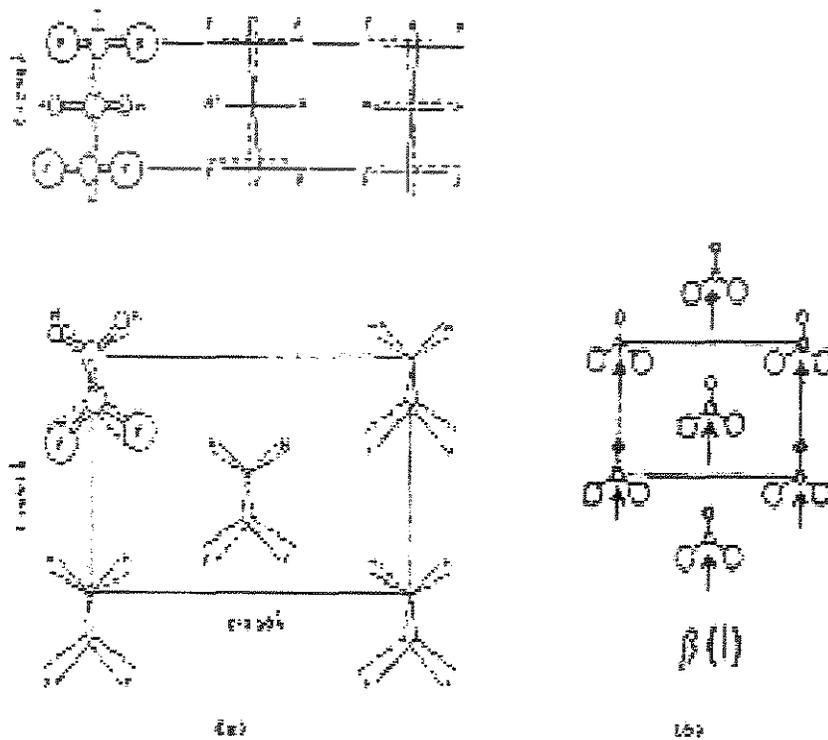
$$a = 8,58 \text{ \AA}$$

$$b = 4,91 \text{ \AA}$$

$c = 2,56 \text{ \AA}$

Pertence ao grupo espacial Cm2m. Nesta fase a cadeia do polímero apresenta conformação planar zig-zag, com isso possui momentos de dipolos elevados ( $7 \times 10^{-28} \text{ C.cm}$ ) e essencialmente normais à cadeia.

A densidade para a fase é de 1,97 e a temperatura de fusão é de  $170^\circ\text{C}$  HASEGAWA *et al.* (1972).



**Figura 7** - PVDF fase  $\beta$  em (a) célula unitária e (b) projeção no plano  $ab$ , com as setas indicando a orientação dos dipolos na cadeia.

**c) Fase  $\gamma$**

Esta fase do PVDF, por ser muito semelhante a uma mistura das fases  $\alpha$  e  $\beta$ , acabou causando uma certa confusão nos pesquisadores. Em 1980, TAKAHASHI e TADOKORO mostraram que a configuração desta fase é classificada como  $T_3G^+ T_3G^-$ . Nesta fase ( $\gamma$ ) as

cadeias são orientadas de maneira que os momentos de dipolos se somam e a célula unitária é polar, monocélula com dimensões:

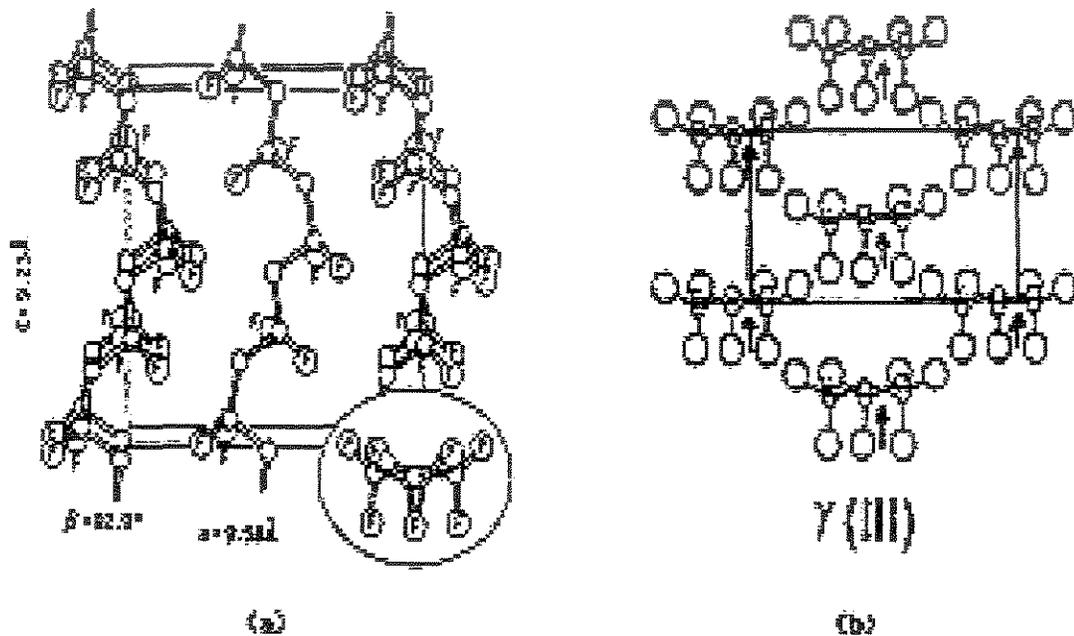
$$a = 4,96 \text{ \AA}$$

$$b = 9,58 \text{ \AA}$$

$$c = 9,23 \text{ \AA}$$

$$\beta = 92,9^\circ$$

Pertencem ao grupo espacial Cc. A Figura 8, mostra a estrutura da fase  $\gamma$ . Sua densidade cristalina é 1,95 e sua temperatura de fusão é de 190°C.



**Figura 8** - Fase  $\gamma$  do PVDF em (a) célula unitária segundo TAKAHASHI e TADOKORO e (b) projeção no plano  $ab$  com as setas indicando a direção dos dipolos na célula unitária.

#### d) Fase $\delta$

É a fase conhecida como a versão polar da fase  $\alpha$ , é obtida após a aplicação de um alto campo elétrico, maior que 1 Mv/cm, na fase  $\alpha$ , transformando-se assim numa célula unitária com as mesmas dimensões e conformações da fase  $\alpha$ ; no entanto as cadeias se

arranjam de maneira diferente DAVIS *et al.* (1978) e NAEGELE *et al.* (1978). No interior da célula unitária os dipolos  $CF_2$  não são mais opostos dois a dois, ocorre uma rotação de  $180^\circ$  em uma cadeia. BACHMANN *et al.* (1980), determinaram que a célula unitária da fase  $\delta$  é ortorrômbica e suas dimensões são:

$$a = 4,96 \text{ \AA}$$

$$b = 9,64 \text{ \AA}$$

$$c = 4,62 \text{ \AA}$$

Pertencem ao grupo  $P2_1cn$ . A projeção nos planos  $ab$  e  $bc$  da célula unitária são mostradas na Figura 9.

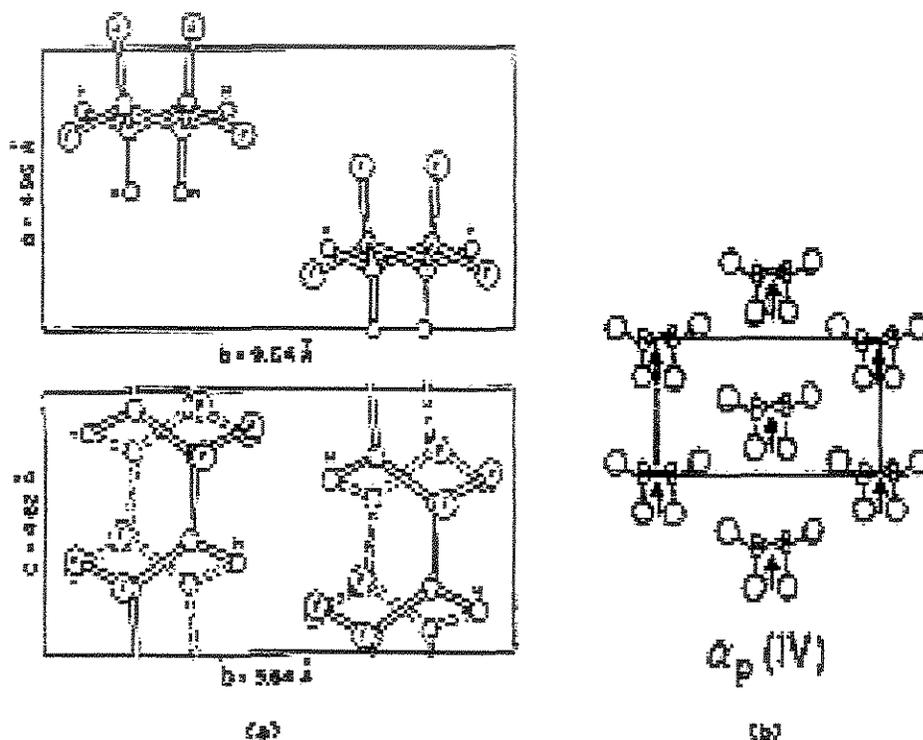


Figura 9 - Célula unitária da fase  $\delta$  do PVDF em (a) projeção no plano "ab" e "bc" segundo BACHMANN *et al.* (1980) e (b) projeção no plano "ab" com as setas indicando a direção dos momentos de dipolos perpendiculares ao eixo da cadeia.

#### 4.4.4. Interconversão das formas do PVDF

Como foi visto o PVDF pode ser obtido em diferentes formas cristalinas, sendo possível a partir de uma dada fase obter-se outra, através de determinados processos. Para exemplificar, alguns procedimentos conhecidos para interconversão de fase são ilustrados na Figura 10.

A fase  $\alpha$  é a mais fácil de ser obtida, mas dentre estas fases a mais importante é a fase  $\beta$ , por apresentar alto grau de domínios ferroelétricos, os quais após ser submetido a um adequado processo, apresenta efeitos piroelétricos e piezoeletrônicos.

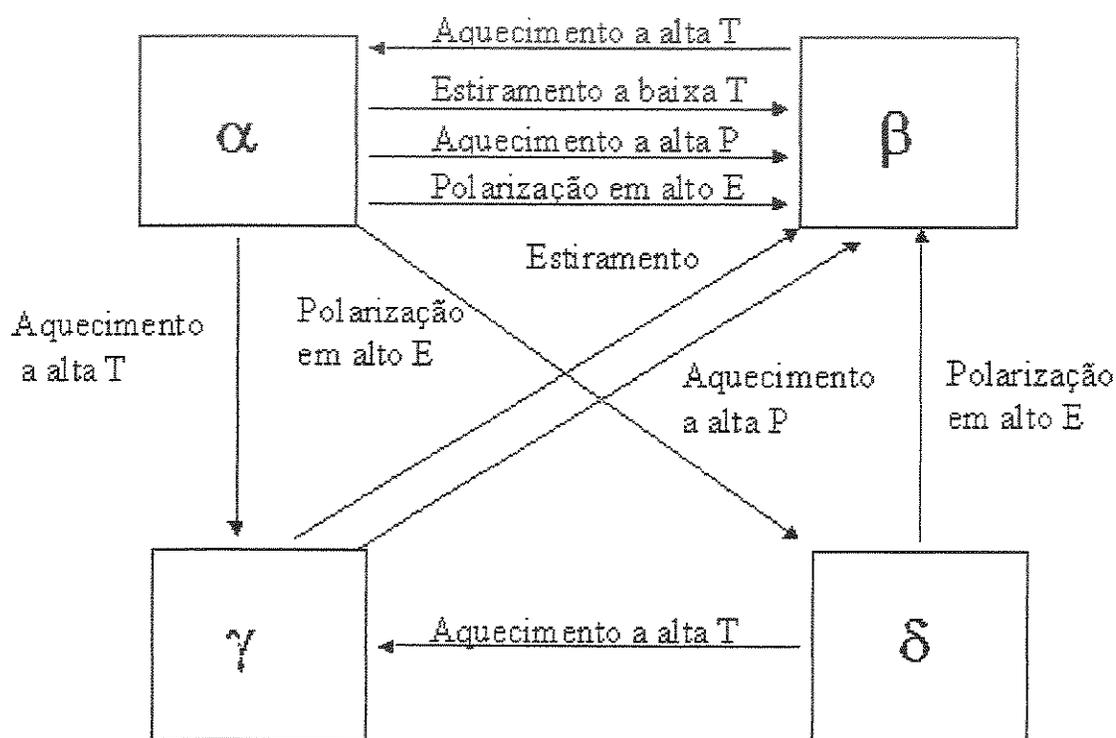


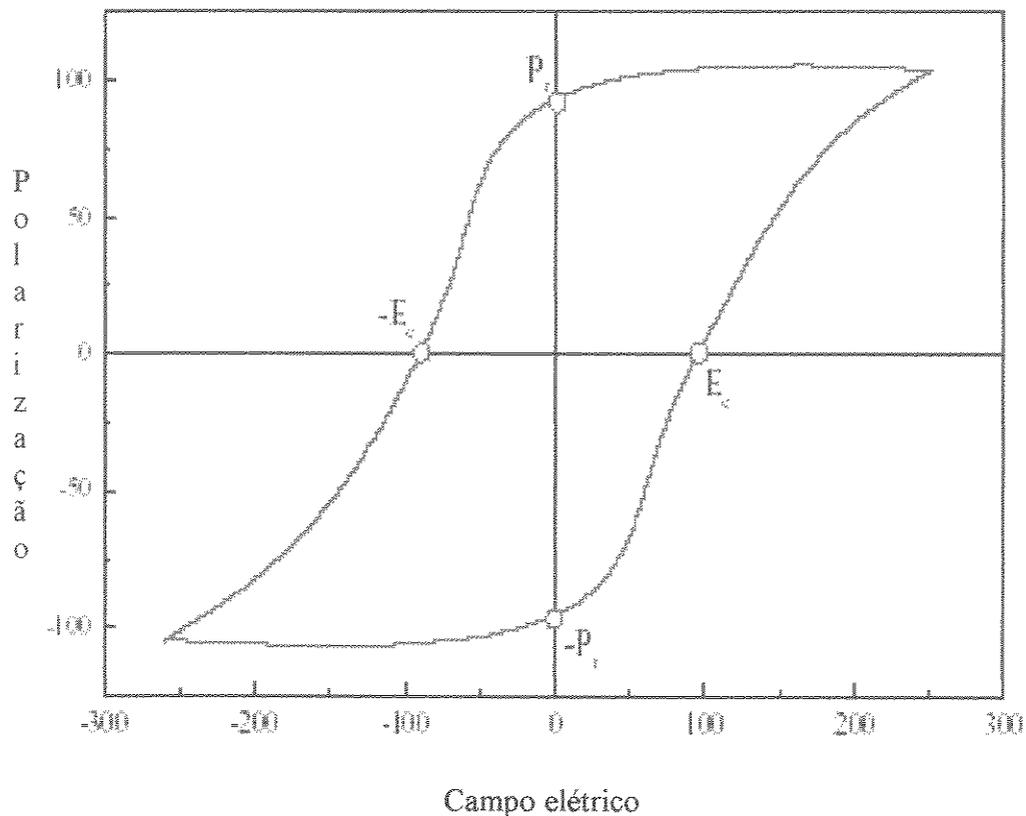
Figura 10 - Diagrama esquemático mostrando as conversões entre as fases do PVDF (T, temperatura; P, pressão; E, campo elétrico) (DAVIS *et al.*, 1978).

#### 4.5. FERROELETRICIDADE

O primeiro material conhecido foi o sal de Rochelle, sendo que este perdia suas propriedades ferroelétricas com uma leve modificação em sua composição, tornando-o pouco atrativo para aplicações industriais.

As propriedades físicas de um material ferroelétrico estão basicamente relacionadas à sua composição química. Dependendo da concentração dos componentes, estas propriedades podem variar largamente em função das variações nas classes cristalográficas.

Do ponto de vista elétrico, os materiais ferroelétricos são aqueles que na ausência de campo elétrico externo exibem uma polarização espontânea, numa certa faixa de temperatura. Esta polarização pode ser revertida por aplicação de um campo elétrico adequado, processo conhecido como *chaveamento ferroelétrico*. Neste tipo de material a relação entre a polarização elétrica,  $P$ , e o campo elétrico,  $E$ , não é dado por uma relação linear. A relação entre  $P$  e  $E$ , chamada de ciclo de histerese (figura 11), é obtida medindo-se a densidade de corrente elétrica através da amostra  $J(t)$  quando é submetida a um campo  $E(t)$ , onde  $t$  é o tempo. A polarização elétrica,  $P$ , é obtida através da integração da densidade de corrente  $J(t)$ , descontadas as contribuições da corrente capacitiva e de condução.



**Figura 11** - Ciclo de histerese, em unidades arbitrárias, típico de um material ferroelétrico.

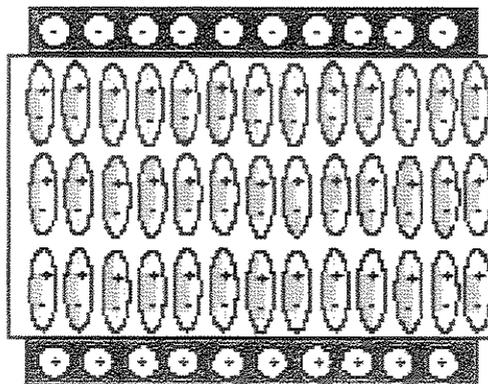
$P_r$  é a polarização remanescente e  $E_c$  é o campo coercitivo.

A magnitude de  $P_r$  e  $E_c$  que caracterizam um material ferroelétrico são representadas na figura 11. São denominadas de *polarização remanescente* e *campo coercitivo*. Essas grandezas são definidas respectivamente como: a quantidade de polarização que permanece quando o campo é removido e, o campo elétrico necessário para causar a reversão de  $180^\circ$  da polarização remanescente previamente induzida.

#### 4.5.1. Propriedade dos Ferroelétricos

Na polarização de tensão elétrica entre seus eletrodos metálicos, cargas livres se acumulam na superfície da placa para neutralizar a carga superficial de polarização. Retirando-se o campo aplicado, a orientação dipolar, o estado polarizado da amostra continua em uma configuração energética favorável, fazendo com que as cargas livres

permaneçam inalteradas. Esta situação é ilustrada na Figura 12. Com isso, pode-se afirmar que o estado polarizado do material ferroelétrico é estável, e, neste caso, não existe campo despolarizante no interior da amostra.



**Figura 12** - Representação esquemática de material ferroelétrico polarizado.

A aplicação de uma tensão reversa na amostra faz os dipolos se re-orientarem, dando origem a uma corrente (fluxo de cargas livres) no circuito externo, em quantidade suficiente para neutralizar as cargas livres que lá se encontram e para neutralizar a nova carga de polarização.

O ciclo de histerese é uma curva característica dos materiais ferroelétricos. Apresenta-se como uma maneira conveniente de investigar suas propriedades fenomenológicas. Cabe mencionar, que em geral todas as medidas de histerese são realizadas de forma contínua, isto é, a tensão aplicada na amostra é variada de forma cíclica e sem interrupção.

#### 4.5.2. Piezoeletricidade e Piroeletricidade (CADY, 1946).

Piezoeletricidade e piroeletricidade são propriedades elétricas apresentadas por alguns materiais, nos quais o elemento comum é a falta de um centro de simetria na sua estrutura molecular.

Piezoeletricidade ou eletricidade por pressão é a propriedade que alguns materiais possuem de adquirir polarização elétrica quando submetidos a tensões mecânicas externas

ou, o efeito reverso, de deformarem-se quando sujeitos a campos elétricos externos (Figura 13).

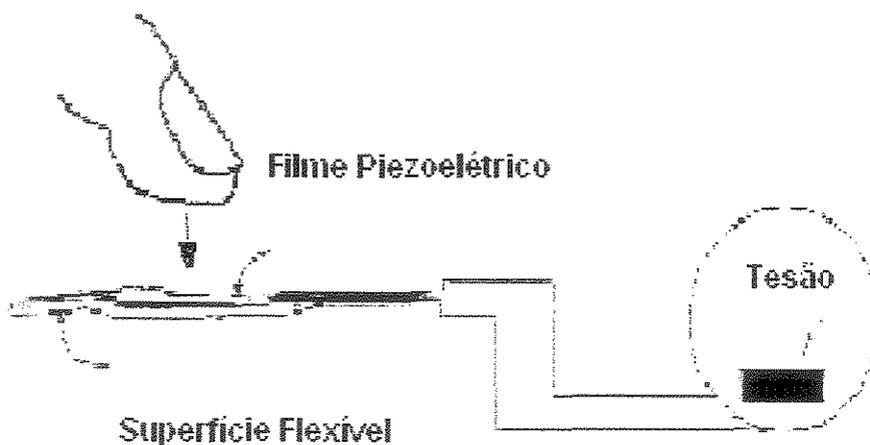


Figura 13 - Efeito piezoelétrico.

A piezoelectricidade também pode ser explicada através das seguintes Figuras 14, 15, 16. Na Figura 14, vê-se a representação de uma molécula dipolar componente do material piezoelétrico, sendo os círculos os átomos com cargas elétricas (+ ou -) e a mola, a força elástica de interação; na Figura 15, aparece um agrupamento dessas moléculas constituindo um material hipotético. Pode-se observar que a diferença de potencial entre um ponto bem distante e o centro  $O$  é nula. Finalmente na Figura 16 tem-se a ação de uma força mecânica  $F$  sobre o cristal, que provoca o deslocamento do centro  $O$  e dessa forma gera uma diferença de potencial em relação a um ponto afastado. Também é observado o efeito reverso, a aplicação de uma diferença de potencial produz deformação na célula. Em condições macroscópicas, isto é, percebido através das medidas de grandezas mecânicas e elásticas, como por exemplo, a deformação e a polarização elétrica.

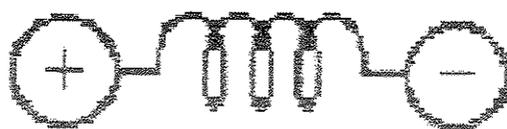


Figura 14 - Representação esquemática de uma molécula dipolar.

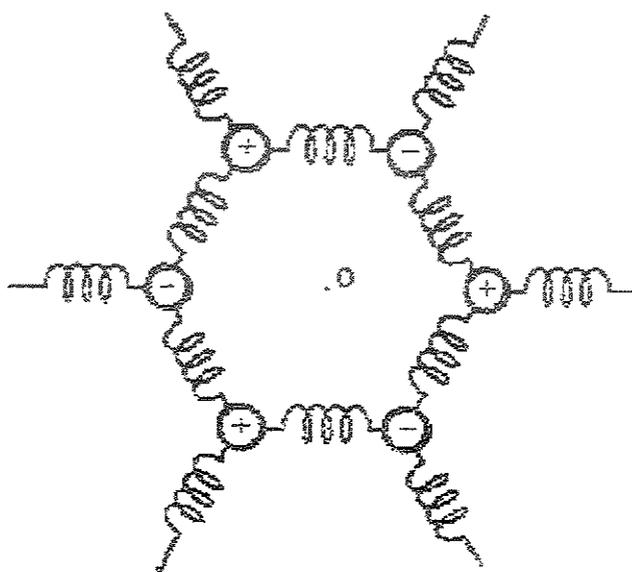


Figura 15 - Representação esquemática de um cristal.

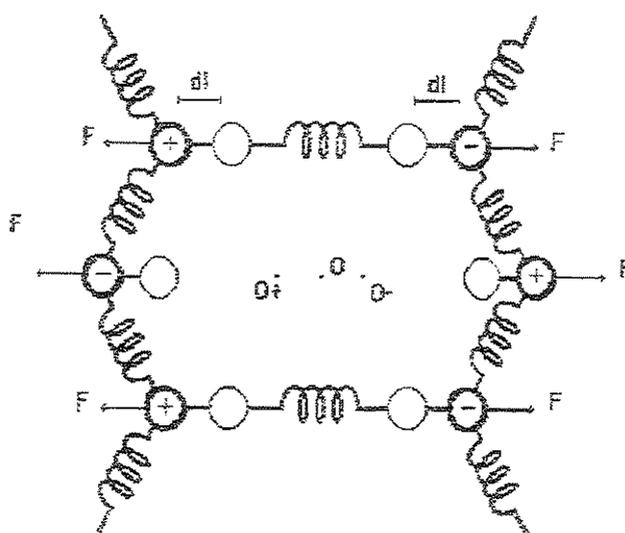


Figura 16 - Representação esquemática de um cristal com centro elétrico deslocado.

A piroeletricidade é definida como a variação na polarização elétrica, resultante de uma mudança na temperatura no material (CADY, 1946; BURFOOT, 1967).

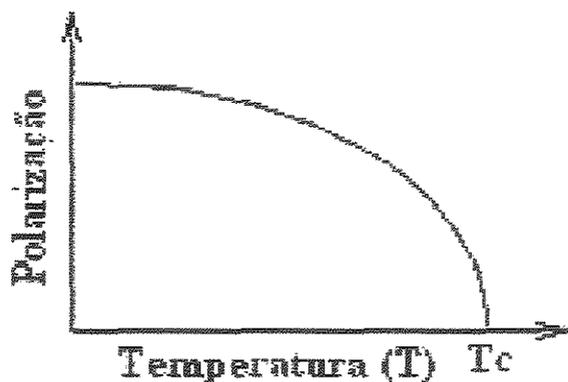
Materiais piroelétricos também são caracterizados pela falta de simetria dos dipolos (não centrossimétricos), ou seja, da cadeia possuindo um momento de dipolo diferente de zero, seja antes ou após um processo de polarização.

Muito análogo aos materiais eletromagnéticos, certos materiais foram reconhecidos e denominados de ferroelétricos, ou seja, os dipolos elétricos acompanham uma mudança (orientação) a um campo elétrico (adequado) aplicado. Também conhecido como campo coercitivo. Como exemplo no PVDF este campo elétrico tem valor de cerca de 1 MV/cm (FURUKAWA, 1986; SINÉZIO, 1990)

Também são conhecidos como ferroelétricos, o que significa que o sentido de sua polarização pode ser revertida pela aplicação de um campo elétrico adequado e sua polarização reduz-se a zero em uma determinada temperatura, conhecida como temperatura Curie ( $T_c$ ); análogo ao ferromagnetismo (JONA, 1962). A dependência da polarização com a temperatura é tipicamente da forma ilustrada na Figura 17. O gradiente da curva,  $dP/dT$ , a uma temperatura particular  $T$ , fornece o coeficiente Piroelétrico ( $p$ ).

$$p = [dP/dT]_{E,X}$$

onde  $p$ , é o coeficiente piroelétrico;  $P$ , é a polarização elétrica;  $T$ , a temperatura;  $E$ , campo elétrico e  $X$ , tensão mecânica.



**Figura 17-** Dependência da polarização ferroelétrica com a temperatura.

Cristais piroelétricos como a Turmalina e a Wurtizita são normalmente chamados de materiais polares, referindo ao único eixo polar existente dentro do reticulado. O comprimento do eixo polar (momento de dipolo) varia de acordo com a temperatura, diminuindo ou aumentando. Esta polarização faz com que apareça uma tensão mecânica ou elétrica entre as extremidades. Atualmente equipamentos utilizam este efeito piroelétrico em sensores de presença, alarmes de incêndio, mapeamento geográfico e outros.

#### 4.5.3. Aplicação dos Filmes Piezoelétricos

A seguir são apresentadas algumas aplicações mais comuns dos filmes de PVDF nas diferentes áreas.

**Tabela 1 -** Aplicações dos filmes piezoelétricos.

Militar e Governamental	Industrial	Informática e telecomunicações	Instrumentação	Medicina
Hidrofonos	Gerenciamento e segurança de energia	Teclados de	Monitoramento de máquinas	Monitoramento de apnea
Fusíveis	Robótica	Impressoras	Adaptação de sistemas ópticos	Pressão sanguínea
Sistemas de	Células	e Copiadoras	-	Ultra-som

segurança	combustíveis		
Geração de energia	Reguladores de pressão	de Microfones	- Termômetros instantâneos
-	Automobilística	Alto falantes	- Osteogênese

#### 4.6. COMPARAÇÃO ENTRE MATERIAIS PIROELÉTRICOS

O coeficiente piroelétrico ( $p$ ) do PVDF é uma ordem de grandeza menor que, por exemplo; do TGS (triglycine sulphate) e o sinal elétrico gerado é menor, exceto para detectores de grandes áreas operando em altas frequências. No entanto, apresenta algumas vantagens sobre o TGS, como: temperatura de operação relativamente alta ( $100^{\circ}\text{C}$ ), baixa condutividade térmica e quimicamente inerte (higroscopia =  $0,6 \text{ g H}_2\text{O/g PVDF}$ ) e baixo custo de produção. A Tabela 2 relaciona as principais propriedades dos materiais mais utilizados como detectores piroelétricos.

Tabela 2 - Propriedades dos materiais mais utilizados como detectores piroelétricos.

Propriedades	Unidades	PVDF	PZT	BaTiO <sub>3</sub>
Densidade	-	1,78	7,5	5,7
Constante dielétrica	$\epsilon/\epsilon_0$	12	1200	1700
Constante $d_{31}$	$(10^{-12})\text{C/N}$	23	110	78
Constante $g_{31}$	$(10^{-3})\text{Vm/N}$	216	10	5
Coefficiente piroelétrico	$\mu.\text{cm}^{-2}.\text{K}^{-1}$	24 - 28	350	180
Impedância acústica	$(10^6)\text{Kb/m}^2\text{-sec}$	2,7	30	30

A constante  $d_{31}$  é a constante piezoelétrica que relacionam a deformação mecânica produzida por um campo elétrico aplicado, e a constante  $g_{31}$ , é a constante piezoelétrica relacionada com o campo elétrico produzido por uma tensão mecânica. O índice "31" significa que a força é aplicada para ângulos retos ao eixo de polarização.

#### **4.7. VANTAGENS E DESVANTAGENS DO PVDF EM RELAÇÃO AOS MATERIAIS TRADICIONAIS, CERÂMICOS E CRISTAIS.**

Quando comparados com os materiais tradicionais, o PVDF apresenta vantagens e desvantagens em relação a suas propriedades mecânicas e elétricas.

Entre as principais vantagens tem-se:

- Trabalham em bandas largas de frequência até GHz;
- Excelente sensibilidade mecânica, chegando a detectar o impacto de micro partículas;
- Baixa impedância acústica;
- Por serem filmes finos e flexíveis, sua elasticidade é maior do que os cerâmicos e cristais;
- Não quebradiços e facilidade de corte e moldabilidade; permite montagens de formatos simples e complexos;
- Biocompatibilidade (importante aplicação nas áreas medica);
- O custo na fabricação e na obtenção dos filmes é mais baixo que os materiais tradicionais.

Entre as desvantagens tem-se:

- Relativo baixo ponto de fusão ( $\sim 170^{\circ}\text{C}$ );
- Baixo coeficiente de conversão ( $d_{31}$ ,  $g_{31}$ ) de energia em comparação com os cerâmicos.

#### **4.8. ARTIGOS E PATENTES ENVOLVENDO O PVDF**

A seguir são listados alguns artigos e patentes utilizando-se as propriedades (piroelétricas e piezoelétricas) o polímero PVDF; nos campos de conversão de energia, robótica, sensores e atuadores.

- PW2 Hauster, E. & Stein L. Presented at Oceans '85 - Hydromechanic-Electric Power Converter.

- PW10 Richard brown, ASL; 3 Mar 1991 - Energy Generation using Piezo Film.
- PW13 USA Patent 3,665,226. R. Sinker, G. Williams; (Hughes Aircraft) May 23, 1972 - Electric Power Source.
- R14 USA. Patent 4,634,917 J.E. Dvorsky, B.A. Kelly, R.B. McCown, D.F. Renner, (Battelle) Dec. 26, 1984 - Active Multi-Layer Piezoelectric polymer fim to Robotic Sensing.
- P12 U.S. Patent 3,824,098 J.G. BERGMAN et al. (Bell Labs) July 16, 1974. - Pyroelectric Copying Device.
- EM5 U.S Patent, 4,666,198 Heiserman, David L., Microflex Technology - Piezoelectric Polymer Microgripper.
- EM22 US Patent 5,295,014, Minoru Toda - two-dimensional Laser beam Scanner using PVDF Bimorph
- SP1 PCT. Patent No. WO 84/04692. P.P. Vanderreydt 6 December 1984 - Devide for Localizing the Impact of a ball or na Object on a Sports Court.
- SP3 U.S Patent No. 4,824,107 Larry J. French, Bay illage, Ohio. April 25 1989 - Sports Scoring Device including a Piezoelectric Transducer.

## V. MATERIAIS E MÉTODOS

### 5.1. APARATO EXPERIMENTAL

O aparato experimental esta esquematizado na Figura 18 e na Figura 19 tem-se uma fotografia da montagem. Basicamente o aparato utilizado é constituído por: fonte de radiação (lâmpada incandescente), “chopper”, detector piroelétrico, pré-amplificador, amplificador e sistemas aquisição de dados. Nos itens subseqüentes serão descritos com mais detalhes.

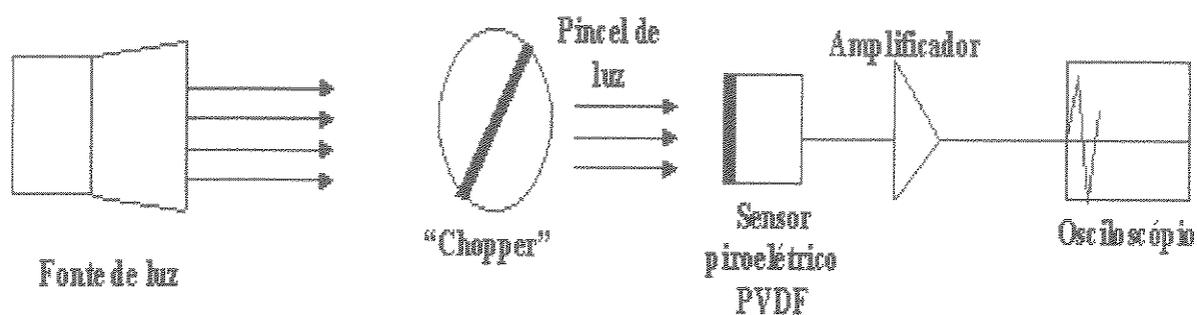


Figura 18 - Diagrama do aparato experimental.

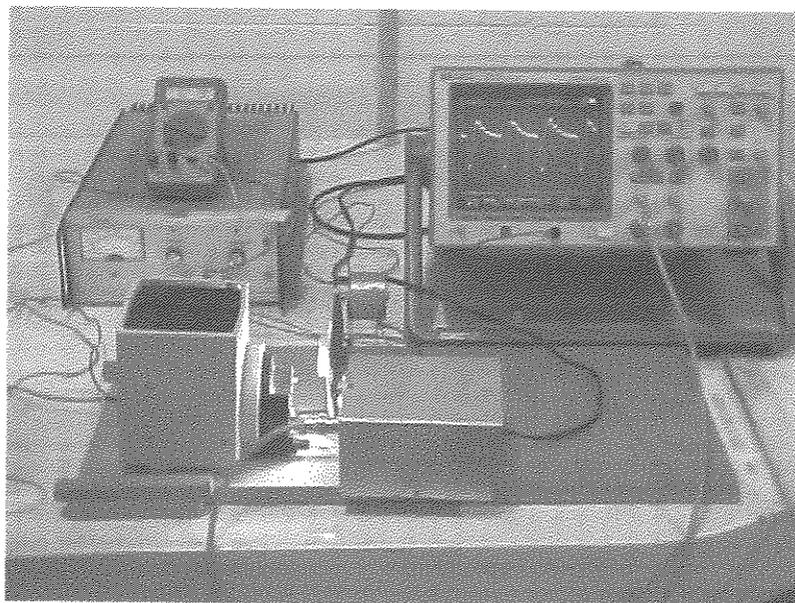


Figura 19 – Aparato experimental

### 5.1.1. Sensor Piroelétrico

O sensor piroelétrico (FURLAN, 1996) é composto por uma fina membrana de PVDF (20  $\mu\text{m}$ ) montada no interior de um conector de latão tipo microfone proporcionando os contatos elétricos e uma adequada sustentação da membrana como mostrada na Figura 20 e 21.

A superfície do sensor foi enegrecida (grafite coloidal) com o objetivo principal de otimizar a absorção da radiação incidente sobre sua superfície. Nas Figuras 22 é mostrado o sensor já montado, sendo que a Figura 23 observa-se o sensor enegrecido.

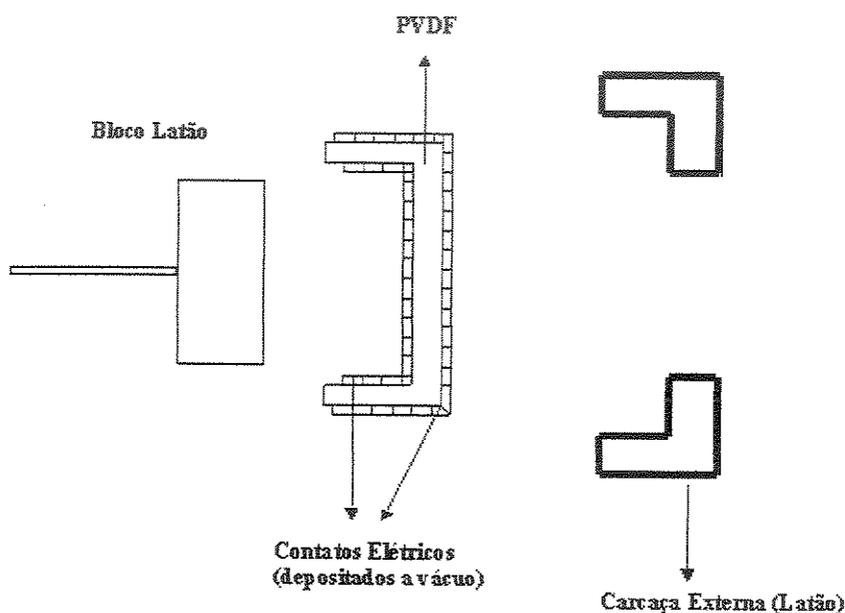


Figura 20 - Diagrama do sensor piroelétrico.

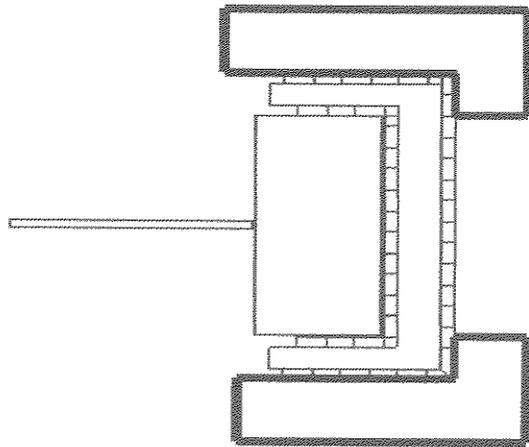


Figura 21 - Diagrama do sensor piroelétrico.

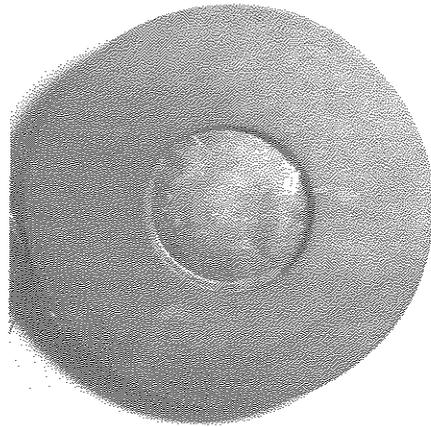


Figura 22 - Sensor piroelétrico

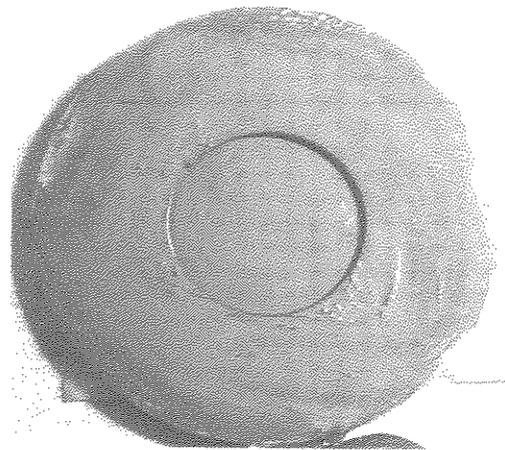


Figura 23 - sensor piroelétrico enegrecido

### 5.1.2. Fontes de Radiação

Neste trabalho foram utilizadas duas lâmpadas incandescentes, uma de  $12V_{DC}$  e 50 watts e outra de  $127V_{AC}$  e 100Watts, com a finalidade de se observar as diferentes influencias dos parâmetros a serem trabalhados.

### 5.1.3. Modulador Mecânico (“CHOPPER”)

Como o sensor piroelétrico opera no modo A.C., respondendo somente a variações, faz-se necessário modular a radiação incidente..

O “chopper” utilizado foi confeccionado em nosso laboratório, e é composto por: placa circular (disco) de alumínio, motor elétrico ( $12V_{DC}$ ), roldanas, correia e fonte de tensão/corrente ajustável.

A placa circular (disco) de Alumínio possui um furo em sua extremidade (Figura 25) o qual permite a passagem de luz proveniente da lâmpada. O motor, acoplado ao disco por meio de roldanas e correia, permite fixar a frequência de modulação da luz incidente no sensor piroelétrico como ilustrada na Figura 24. Frequência esta medida através do osciloscópio.

A placa de Alumínio foi também enegrecida para evitar que reflexões espúrias retornem ao sensor piroelétrico.

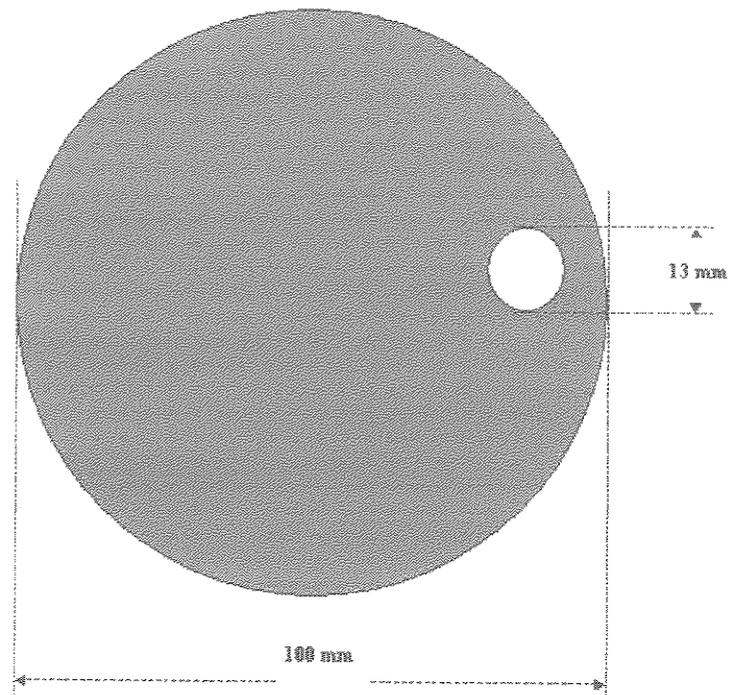


Figura 24 - Disco de Alumínio

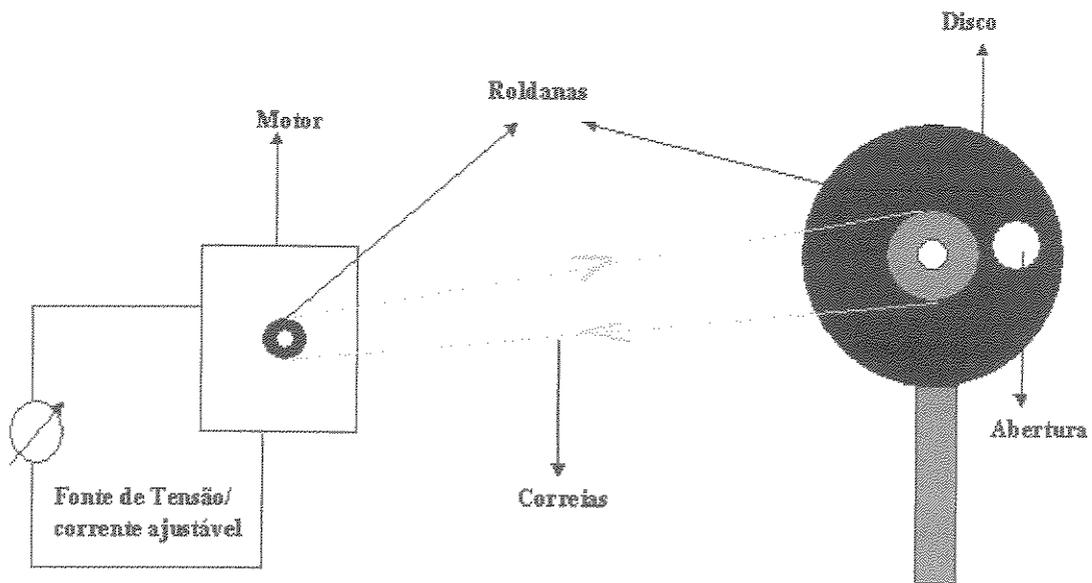
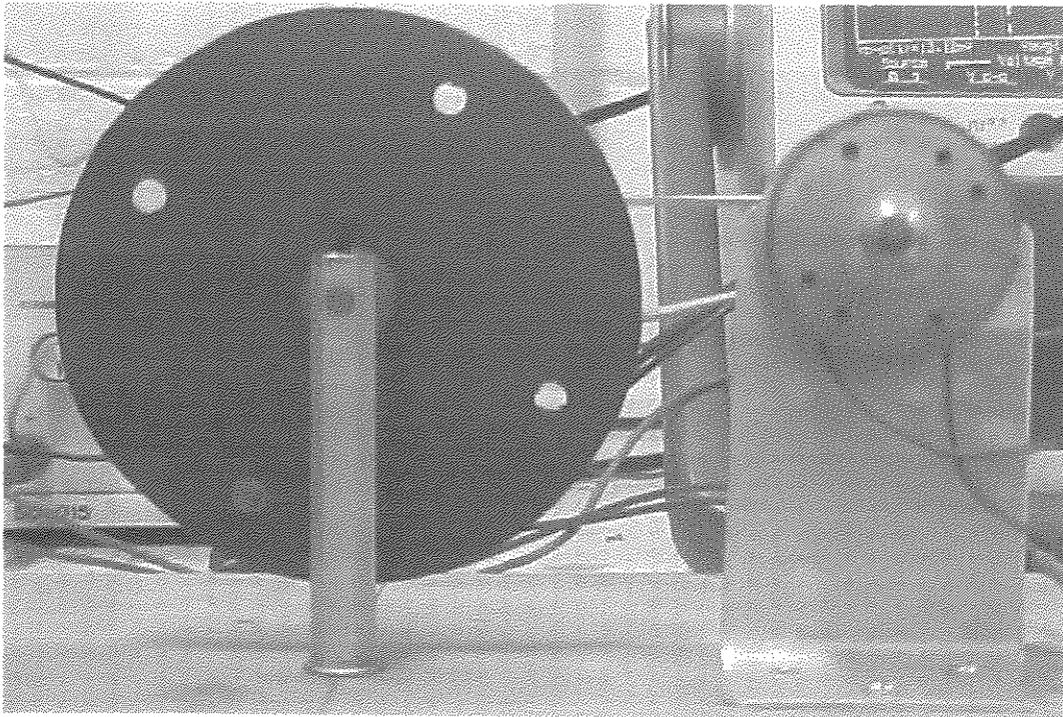


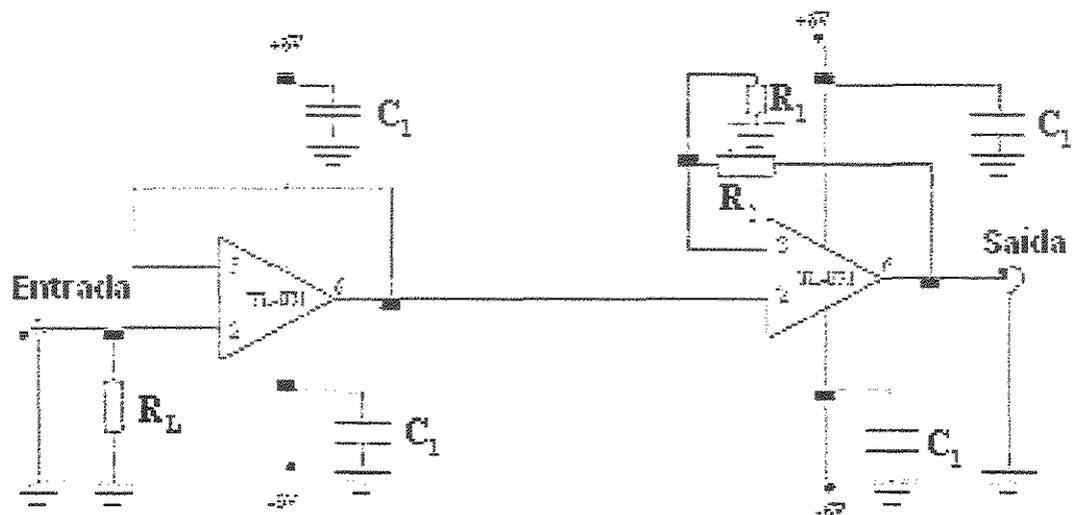
Figura 25 – Modulador Mecânico, “chopper”, vista frontal disco mais fonte de tensão e motor.



**Figura 26** – Modulador mecânico e motor

#### **5.1.4. Circuitos Pré-amplificador e Amplificador**

O circuito pré-amplificador foi projetado para ser conectado o mais próximo possível do sensor evitando-se a presença de fios e cabos, com objetivo de minimizar ruídos, e capacitâncias parasitas.



$$\text{Ganho} = R_2/R_1 + 1$$

Figura 27 – Esquema elétrico do circuito pré-amplificado.

O circuito é constituído por: resistor de carga (“shunt”,  $R_L$ ), seguidor de sinais e amplificador com ganho de 100 vezes ( $R_1 = 100\Omega$ ,  $R_2 = 10\text{ K}\Omega$ ). O componente JFET TL-071 foi escolhido devido a seu baixo nível de ruído e alta impedância de entrada ( $Z_{in} = 10^{12}\Omega$ ).

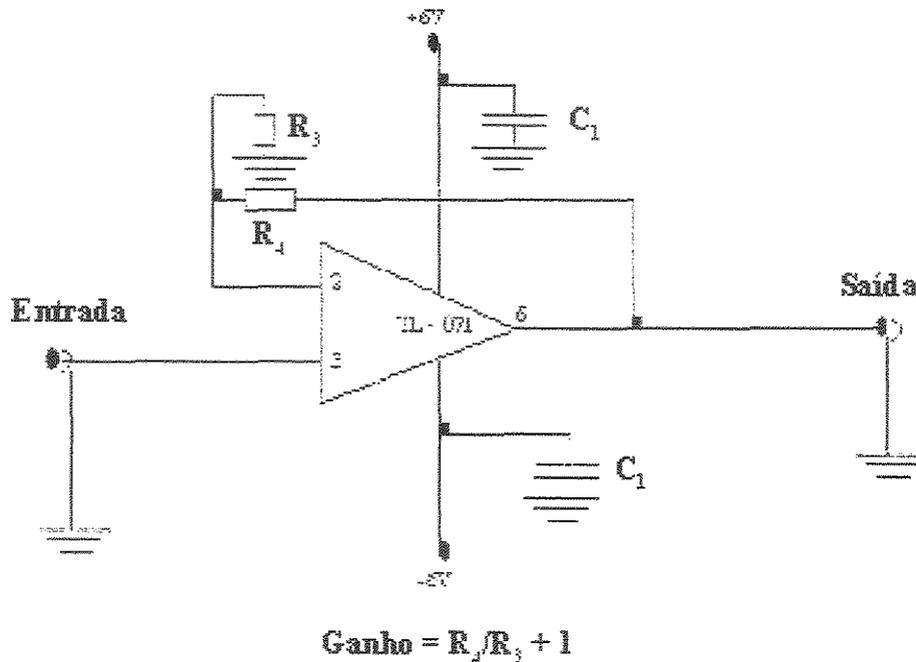


Figura 28 – Esquema elétrico do amplificador.

O sinal proveniente do estágio anterior (pré-amplificador) é amplificado com ganho de 100 vezes. Deve-se evitar o uso de resistores variáveis para ajuste do ganho, pelo fato destes componentes contribuírem com auto nível de ruído no sinal elétrico, pois se procura uma ótima relação sinal/ruído.

#### 5.1.5. Sistema de Leitura

O sistema de leitura é composto por: osciloscópio digital (Tektronics – modelo 2230), medidor de corrente (Ininipa – Digital Clamp Multimeter ET – 3110), Luxímetro (Texto 545) e milivoltímetro A.C. (Pracitronic – modelo MV21). Os sinais elétricos após passarem do PVDF-amplificador são amostrados nestes equipamentos e seus valores são anotados/registrados.

#### 5.2. Metodologia Experimental e Estatística

Neste trabalho, o objetivo foi caracterizar o sinal elétrico desenvolvido no conjunto sensor piroelétrico + amplificador em função dos parâmetros: potência da fonte de luz,

distância fonte-detector, área iluminada, frequência do “chopper”. Assim, as medidas foram realizadas, estudando-se o sinal elétrico gerado em função de um parâmetro, fixando-se os demais. Por exemplo, sinal elétrico em função da distância, fixa-se então a potência da fonte, a frequência do “chopper” e o valor da área iluminada. Também foram realizadas medidas de calibração da intensidade de luz com um luxímetro.

Após medir todas as possíveis combinações, os resultados foram graficados e analisados, utilizando-se as ferramentas do programa “Statistica”. Para otimizar os resultados obtidos e abranger todos os parâmetros, experimentos iniciais foram realizados no sentido de coletar os sinais e trata-los no “software Statitica”, possibilitando voltar nossa atenção à influência de cada parâmetro (acima citado), os quais serão denominados a seguir por: primeira amostragem e segunda amostragem.

As medidas dos sinais de saída visam estabelecer o comportamento do sensor em função da frequência do “chopper”, distância lâmpada-sensor, área de incidência do sensor e intensidade luminosa. Cabe ressaltar que se optou por usar o sensor com a superfície enegrecida com a finalidade de ter o maior ganho possível na absorção da radiação incidente.

No tratamento estatístico estudou-se a influência de parâmetros utilizados no processo. Estas amostragens têm como finalidade definir o campo de medida e a conduta do experimento.

Inicialmente realizaremos um planejamento fatorial de  $2^3$  com 4 pontos centrais para verificar a influência das variáveis frequência do “chopper”, distância lâmpada-sensor e área iluminada do sensor; e posteriormente realizou-se outro planejamento fatorial. Desta vez usou-se um planejamento de  $2^4$  com 4 pontos centrais onde as variáveis, estudadas foram frequência do “chopper”, distância lâmpada-sensor, área iluminada do sensor e intensidade luminosa, com a finalidade de observar se os parâmetros estudados tem alguma interação entre eles e também se com o quarto parâmetro adicionado as interações aumentam ou não e como elas influenciam no processo.

Os níveis dos fatores e as matrizes do planejamento deste projeto são mostrados nas Tabelas 3 e 4, para o primeiro planejamento e tabelas 5 e 6 para o segundo planejamento, respectivamente. Os valores (-1), (0) e (+1) correspondem ao menor nível, o nível médio e o maior nível, respectivamente.

Para o primeiro planejamento utilizou-se uma lâmpada de 12V – 50 watts e no segundo planejamento a fonte luz utilizada é uma lâmpada incandescente de 127V e 100 watts, na qual adaptou-se um controlador de potência de tal modo a permitir ajustar a potência entregue para a lâmpada. Também se usou um medidor de corrente para ter conhecimento da corrente entregue ao sistema e assim calcular a potência real da lâmpada.

**Tabela 3 - Níveis de Operação do Planejamento  $2^3$**

Fatores	(-1)	(0)	(+1)
X1. Frequência do “Chopper” (Hz)	10	19	28
X2. Distância lâmpada-sensor (cm)	16	19	22
X3. Área iluminada do sensor (cm <sup>2</sup> )	0,21	0,64	1,33

Na Tabela 3, os valores utilizados para cada nível, foram escolhidos levando-se em conta algumas limitações dos equipamentos. Os valores mínimos são representados por (-1), os valores máximos por (+1) e os pontos centrais por (0). No caso da frequência, o dispositivo utilizado não permitia utilizar frequências abaixo de 10 Hz, sendo assim, usou-se como valor mínimo 10 Hz, e como valor máximo 28 Hz, já que acima de 28 Hz, verificou-se que não haveria interferência no sinal de saída e sim poderia existir interferência por causa de outros efeitos como tipo piezoelétrica. No caso da distância os valores utilizados foram também limitados pelo espaço físico, trabalhando-se assim com uma distância mínima de 16 cm e como máxima 22 cm. E as áreas utilizadas para cada sensor foram escolhidas devido a trabalhos já realizados com estes sensores, evitando assim a construção de novos sensores. E os pontos centrais não são nada mais que uma média entre o ponto mínimo e ponto máximo para cada parâmetro, e têm como finalidade estimar todos os parâmetros do modelo.

**Tabela 4 - Matriz de Planejamento Experimental  $2^3$  e Resposta (tensão Pico-Pico)**

Ensaio	X1	X2	X3	Tensão Piroelétrica pico a pico Vpp (mV)
1	-	-	-	119
2	+	-	-	78
3	-	+	-	110
4	+	+	-	70
5	-	-	+	433
6	+	-	+	259
7	-	+	+	245
8	+	+	+	157
9	0	0	0	185
10	0	0	0	187
11	0	0	0	185
12	0	0	0	189

A Tabela 4 mostra os valores mínimos, máximos e pontos centrais de forma codificada, com seus respectivos resultados. Utilizando-se (-), para os valores mínimos, (+), para os valores máximos e (0), para os pontos centrais.

Para o segundo planejamento fatorial tem-se:

**Tabela 5 - Níveis de Operação do Planejamento  $2^4$** 

Fatores	(-1)	(0)	(+1)
X1. Frequência do "Chopper" (Hz)	10	19	28
X2. Distância lâmpada-sensor (cm)	3	11,5	20
X3. Área iluminada do sensor (cm <sup>2</sup> )	0,21	0,64	1,33
X4. Intensidade luminosa (watts)	23	55	99

Na tabela 5, ao igual que na Tabela 3, os valores de cada parâmetro foram escolhidos levando em consideração as limitações dos equipamentos. Neste caso teve o

acréscimo da intensidade luminosa, onde se usou como valor mínimo 23 watts, valor máximo 99 watts e 55 como ponto central. A Tabela 6 representa os valores mínimos, máximos e pontos centrais codificados.

**Tabela 6 – Matriz de Planejamento Experimental  $2^4$  e Resposta (Tensão Pico-Pico)**

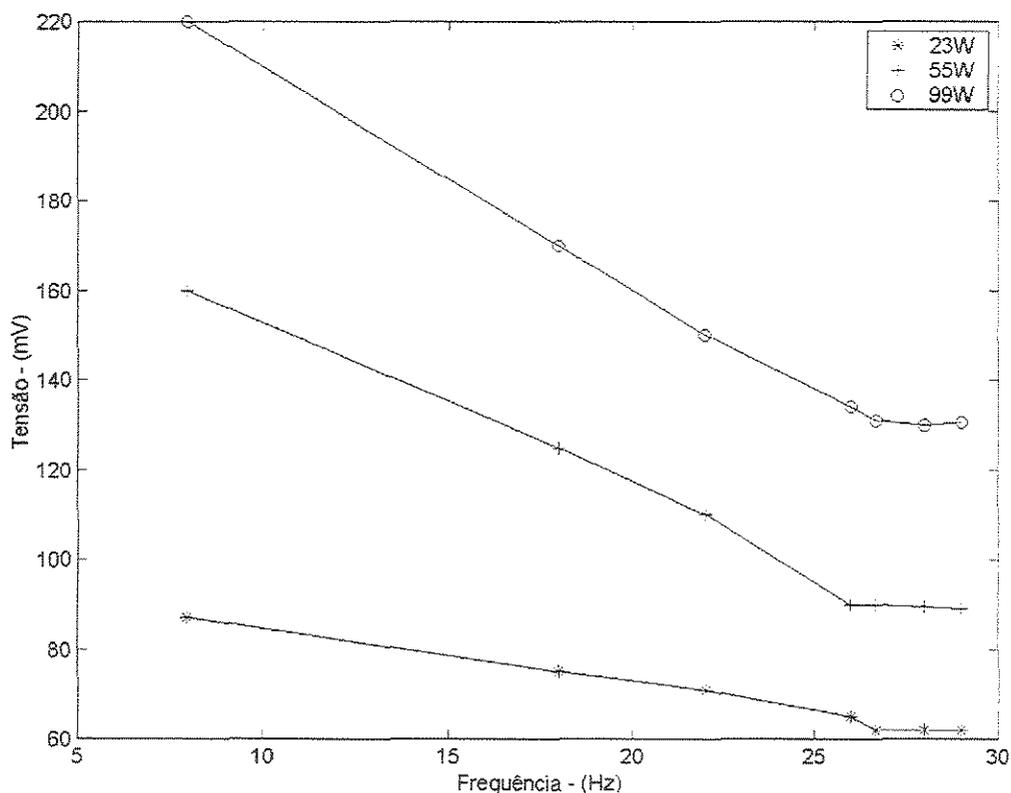
Ensaio	X1	X2	X3	X4	Tensão Piroelétrica pico a pico Vpp (mV)
1	-	-	-	-	290
2	+	-	-	-	130
3	-	+	-	-	25
4	+	+	-	-	19
5	-	-	+	-	560
6	+	-	+	-	350
7	-	+	+	-	54
8	+	+	+	-	45
9	-	-	-	+	581
10	+	-	-	+	295
11	-	+	-	+	45
12	+	+	-	+	32
13	-	-	+	+	1300
14	+	-	+	+	625
15	-	+	+	+	118
16	+	+	+	+	290
17	0	0	0	0	118
18	0	0	0	0	115
19	0	0	0	0	112
20	0	0	0	0	115

## VI. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os resultados obtidos na investigação. Os estudos dos parâmetros frequência do “chopper”, distância lâmpada-sensor, área iluminada do sensor e intensidade luminosa, visam levantar o melhor ponto de trabalho do detector piroelétrico.

Os resultados gerados pela absorção da energia incidente em função dos parâmetros avaliados, são pouco conhecidos, devido aos poucos artigos publicados envolvendo este tipo de pesquisa. Os resultados não poderão ser comparados com literatura especializada. Sendo assim, procuraremos realizar algumas discussões envolvendo nossos resultados.

### 6.1. Sinal piroelétrico em função da frequência do “chopper” (Hz) e das diferentes potências incidentes (watts)

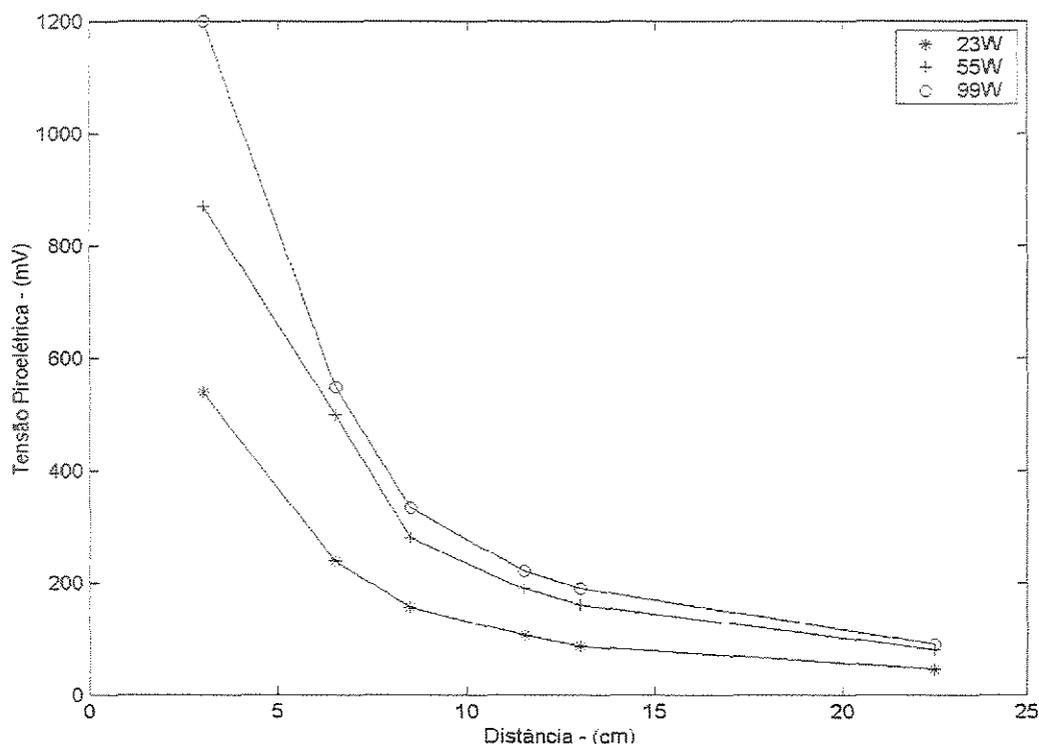


**Figura 29** – Tensão piroelétrica (mV) em função da frequência (Hz), com distância constante (6 cm), área de incidência do sensor constante ( $0,9 \text{ cm}^2$ ), para valores de 23, 55 e 99 watts.

Pode-se observar a existência de uma região de frequência para a qual a tensão piroelétrica permanece praticamente constante, sendo que a partir dessa região o sinal obtido também permanece constante, pois haverá uma saturação na transformação do sinal pelo sensor. Observa-se também que o sinal piroelétrico aumenta com o aumento nas potências das lâmpadas, sendo assim, pode-se dizer que o aumento do sinal piroelétrico é proporcional à potência de energia luminosa que atinge o sensor piroelétrico.

Observou-se no experimento que para frequências de 0 – 26 Hz a tensão piroelétrica decresce e acima de 26 Hz a tensão tende a ficar constante (tensão independente da frequência). A partir de 26 Hz, a tendência do sinal de saída ficar constante, deve-se que a partir de uma determinada frequência, o sensor não tem tempo de realizar o ciclo completo de transformação do sinal de luminoso que incide nele em sinal elétrico. Sendo assim este comportamento permite que se estabeleçam condições para o uso de sensor em diversas regiões de frequência sem alterações no equipamento.

## 6.2. Sinal piroelétrico em função da distância (cm) e das diferentes potências incidentes (watts)

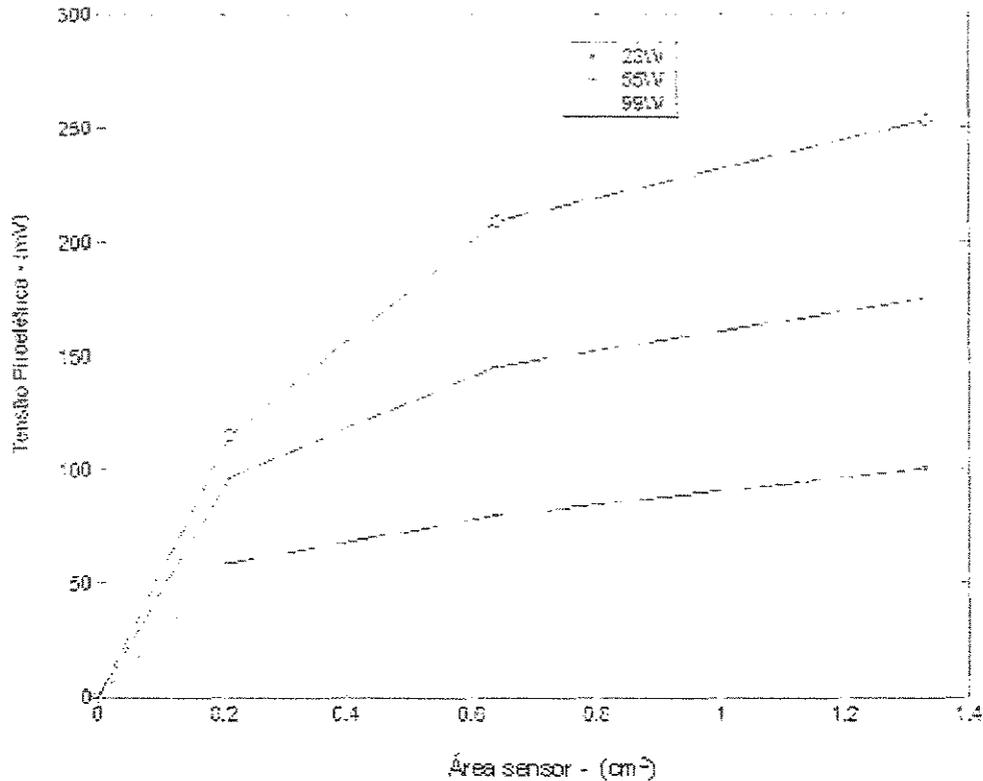


**Figura 30** – Tensão Piroelétrica (mV) em função da distância (cm), com frequência constante (10Hz) e área constante ( $0,64 \text{ cm}^2$ ), para valores de 23, 55, 99 watts.

Montou-se o detector piroelétrico sobre uma plataforma a qual permite variar a distância entre o sensor e a fonte de radiação (lâmpada incandescente); neste caso foi à fonte de radiação o “equipamento móvel”. A distância mínima  $X_0$  entre detector e fonte permitida pela montagem é de 3 cm, e fixou-se a frequência de trabalho em 10 Hz.

De acordo com a figura observa-se que a tensão piroelétrica diminui com o aumento da distancia, o qual era esperado, já que a fonte de radiação utilizada não apresentava feixes de luz paralelos. Assim ao aumentar a distância lâmpada-sensor, a dispersão dos feixes de luz é maior, com isso o numero de feixes que atingem a superfície do sensor são menores, diminuindo a transformação de energia térmica em elétrica.

### 6.3 Sinal piroelétrico em função da área iluminada do sensor ( $\text{cm}^2$ ) e das diferentes potências incidentes (watts)

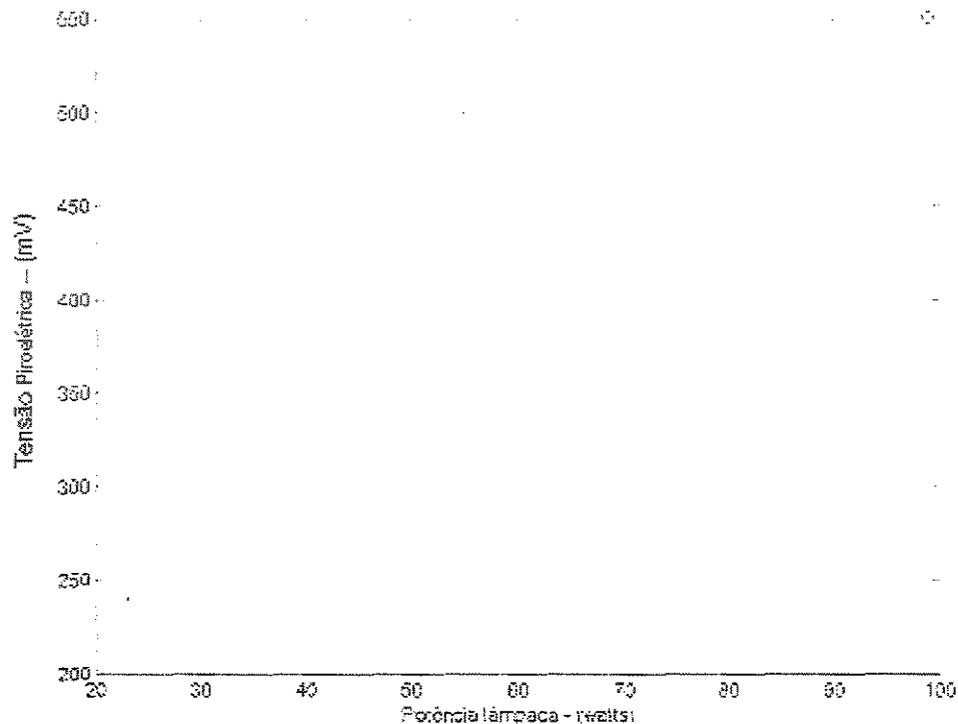


**Figura 31** – Tensão Piroelétrica (mV), em função da área iluminada do sensor ( $0,64 \text{ cm}^2$ ), com frequência constante (10 Hz) e distância constante (6 cm), para valores de 23, 55, 99 watts.

O comportamento do sinal de saída em função das áreas sensíveis do sensor é mostrado na Figura 31.

Tais medidas foram efetuadas utilizando uma lâmpada incandescente, mantendo-se fixa a distância entre lâmpada e sensor em 6 cm. Foram realizadas medidas para potências diferentes (23, 55 e 99 watts), sendo que a frequência de trabalho escolhida foi àquela mínima trabalhada (10 Hz), pois obtém-se maior tensão piroelétrica. Como se pode observar a tensão piroelétrica aumenta com o aumento da área atingida do sensor; com isso quando maior a área maior a tensão piroelétrica obtida.

#### 6.4 Sinal piroelétrico em função das diferentes potências incidentes no sensor (watts)



**Figura 32** – Tensão Piroelétrica (mV), em função da potência (watts) alimentada na fonte, com frequência constante (10 Hz), distância constante (6 cm) e área atingida do sensor constante em  $0,64 \text{ cm}^2$ .

Na Figura 32 observa-se que a tensão piroelétrica aumenta conforme se aumenta a potência da lâmpada. Então, quando maior a intensidade luminosa incidente no sensor, maior o sinal de saída. No entanto, cabe ressaltar que o sensor pode chegar no seu limite de trabalho, onde ele poderá saturar, sendo assim não adianta aumentar a potência da intensidade luminosa incide, pois o sensor não terá capacidade de transforma-la.

## 6.5 Análise Estatística

O estudo estatístico ajuda a definir as melhores condições do sistema, indicando os parâmetros que mais influenciam e como eles influenciam no processo. Assim, é possível ter informações sobre quais são as melhores condições para operar o sistema.

A seguir apresentam-se resultados obtidos no primeiro e segundo planejamento estatístico.

### 6.5.1 Primeiro Planejamento

Inicialmente realizou-se um planejamento fatorial  $2^3$ , usando os seguintes parâmetros: frequência do “chopper” (Hz), distância lâmpada-sensor (cm) e área de incidência no sensor ( $\text{cm}^2$ ). A seguir são apresentados os resultados obtidos.

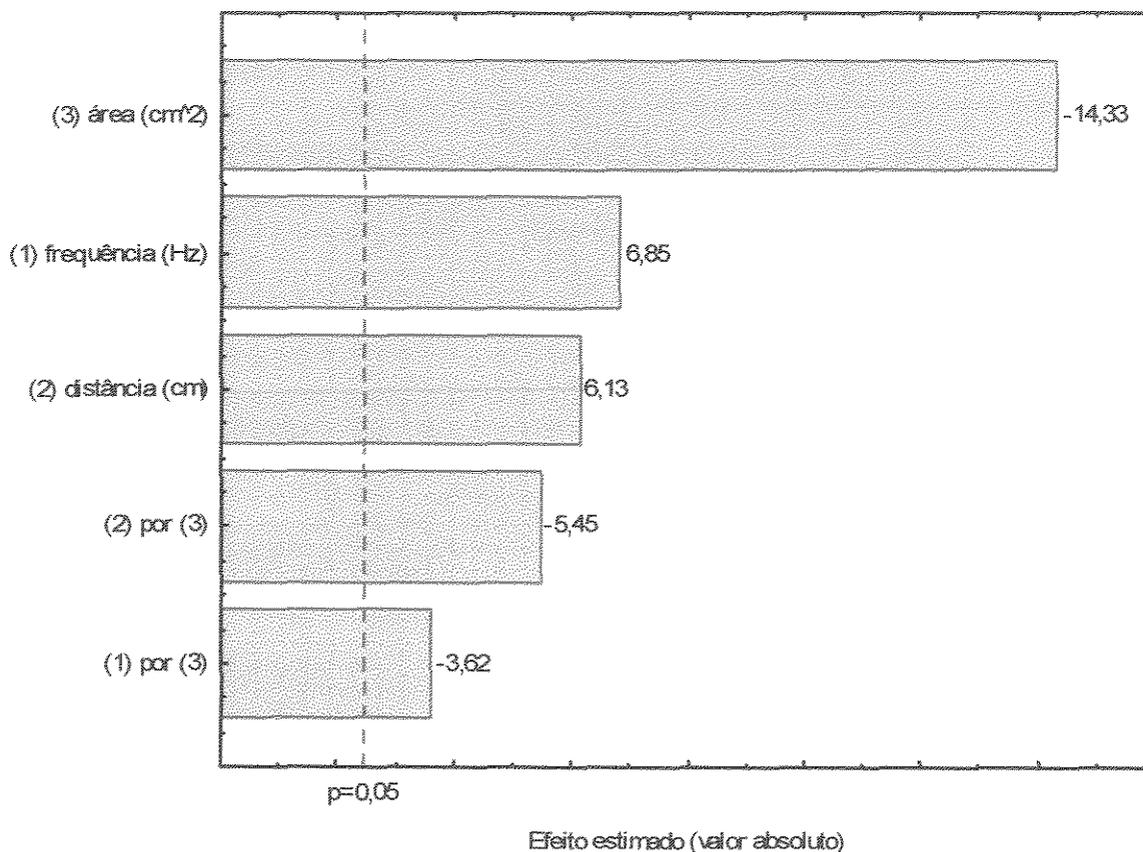


Figura 33 - Gráfico de Pareto do primeiro planejamento

O gráfico de Pareto expresso na Figura 33 mostra que todas as variáveis estudadas são significativas no processo, assim como as interações entre diâmetro - frequência e diâmetro - distância. A interação distância e frequência não se apresentaram significativa no modelo e foi excluída. Observa-se que a frequência, distância e as interações apresentam valores negativos de *t student* indicando que para valores menores aos níveis mínimos utilizados (-1), a resposta será intensificada. Com isso o programa indica que provavelmente quando trabalha-se com valores menores do que os utilizados no experimento obter-se-á resultados melhores do que os apresentados.

Os coeficientes de regressão estão apresentados na tabela 7. Estes parâmetros predizem o modelo descrito abaixo da tabela e todas as probabilidades encontradas,  $p < 0,05$ , foram significativas, o que confirma o gráfico de Pareto.

**Tabela 7 - Coeficientes de Regressão primeiro planejamento**

	Coeficiente de Regressão	Erro Padrão	t(15)	p
Média	184,75	5,11	36,17	<0,0001
(1) Diâmetro (cm)	89,63	6,26	14,33	<0,0001
(2) Distância (cm)	-38,38	6,26	-6,13	0,0008
(3) Frequência (Hz)	-42,88	6,26	-6,85	0,0004
(1) por (2)	-34,13	6,26	-5,45	0,001
(1) por (3)	-22,63	6,26	-3,62	0,01

Modelo obtido:

$$V_{pp} = 184,75 + 89,63X_1 - 38,38X_2 - 42,88X_3 - 34,13X_1 * X_2 - 22,63X_1 * X_3$$

**Tabela 8 - Análise de variância (ANOVA) primeiro planejamento**

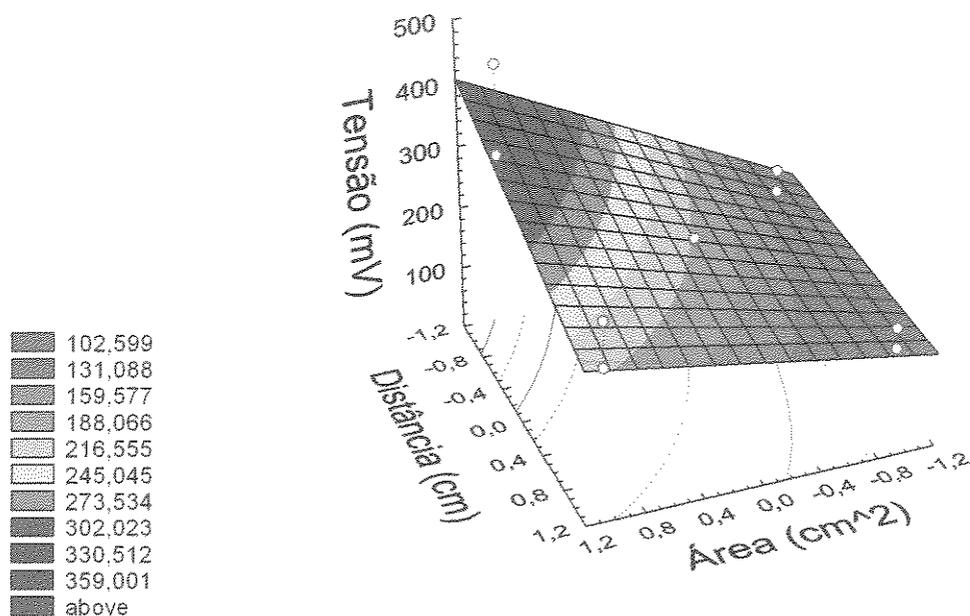
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F <sub>calc</sub>
Regressão	104159,63	5	20831,93	66,53
Resíduos	1878,62	6	313,10	

Falta de ajuste	1867,63	3	622,54
Erro puro	11	3	3,67
TOTAL	106038,25	11	9639,84

$$R^2 = 98,23\%$$

$$F_{\text{tabelado}}(0,95;5,6) = 4,39 \text{ (BARROS e BRUNS, 1995).}$$

Com a tabela 8 pode-se verificar através da ANOVA que o modelo obtido é bom ( $R^2 = 98,23\%$ ), pois, apresenta o  $F_{\text{calculado}}$  (teste Fischer) de 66,43, sendo que de acordo com a literatura, quando  $F_{\text{calculado}}$  for de 6 a 7 vezes maior que o  $F_{\text{tabelado}}$ , pode-se considerar que o modelo é bom.



**Figura 34** - Superfície de resposta tensão em função da distância vs. área

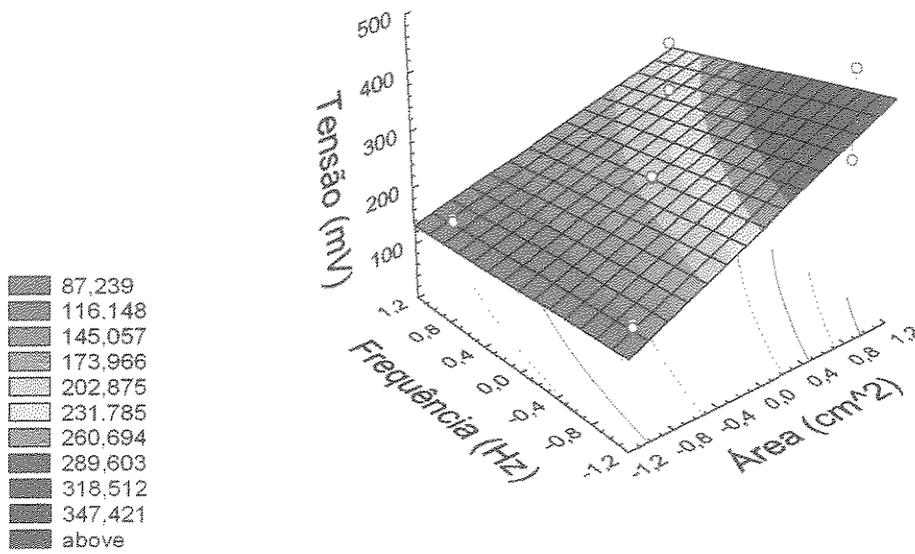


Figura 35 - Superfície de resposta tensão em função da frequência vs. área

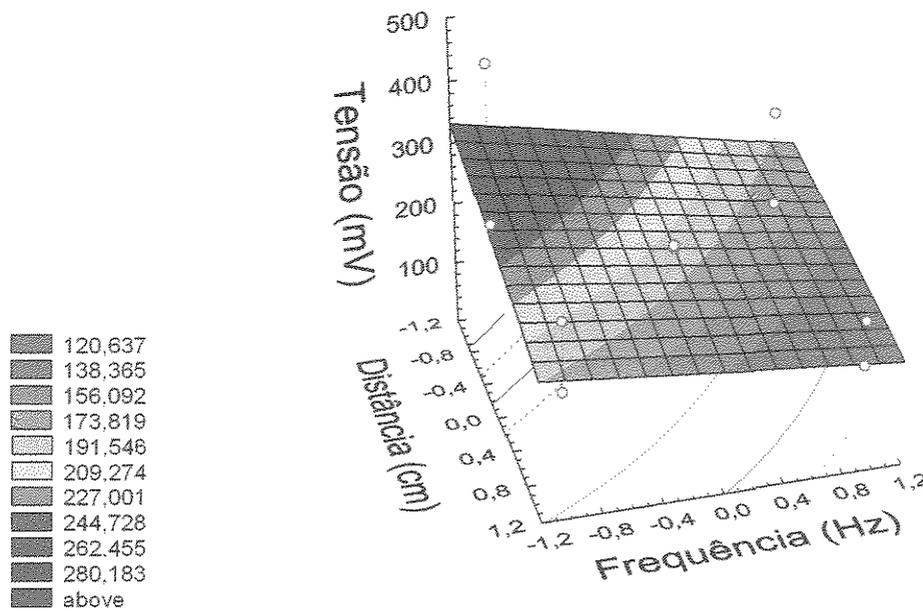


Figura 36 - Superfície de resposta tensão em função da frequência vs. distância

Através dos gráficos de superfície de resposta colantes nas figuras 34, 35, 36 nota-se que a resposta é intensificada com: distâncias menores; diâmetros maiores e frequências levemente mais baixas.

### 6.5.2 Segundo Planejamento

Realizou-se um planejamento fatorial  $2^4$ , usando os seguintes parâmetros: frequência do “chopper” (Hz), distância lâmpada-sensor (cm), área de incidência no sensor ( $\text{cm}^2$ ) e intensidade luminosa (watts). A seguir são apresentados os resultados obtidos no planejamento fatorial  $2^4$ .

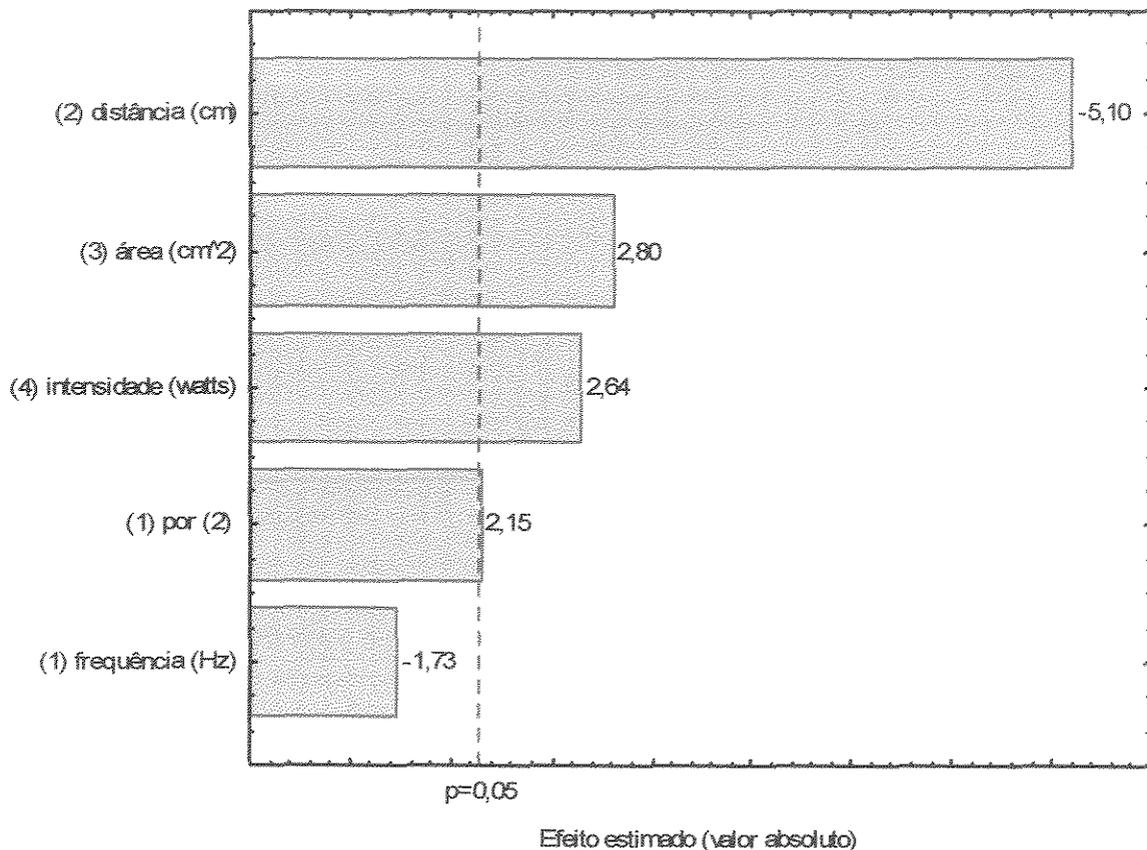


Figura 37 - Gráfico de Pareto segundo planejamento.

O gráfico de Pareto expresso na Figura 37 mostra, que a frequência não tem influência relevante no modelo ( $p > 0,05$ ). Além disso, a distancia apresenta o valor de *t students* negativo; portanto a resposta será intensificada utilizando valores menores que os

empregados neste experimento. Também se observa que algumas interações foram descartadas por não apresentarem influência no processo. Deve-se ressaltar que mesmo a frequência não apresentando influência no processo, ela deve ser considerada, pois a nível experimental é um parâmetro importante e como pode ser observado no gráfico de Pareto, ela tem interação significativa com a distância.

**Tabela 9** - Coeficientes de Regressão segundo planejamento

	Coeficiente de Regressão	Erro Padrão	t(15)	p
Média	260,95	38,37	6,80	<0,0001
(1) Frequência (Hz)	-74,19	42,90	-1,73	0,1
(2) Diâmetro (cm)	120,31	42,90	2,80	0,01
(3) Distância (cm)	-218,94	42,90	-5,10	0,0001
(4) Intensidade (watts)	113,31	42,90	2,64	0,01
(1) por (3)	92,19	42,90	2,15	0,04

Modelo obtido:

$$VPP = 260,95 - 74,19X_1 + 120,31X_2 - 218,94X_3 + 113,31X_4 + 92,19X_1 \times X_3$$

Para predizer o modelo, utilizou-se os coeficientes de regressão (tabela 9), sendo que a variável frequência mesmo não sendo significativa ( $p > 0,05$ ), foi considerada no modelo, pois na interação com a distância mostrou-se significativa.

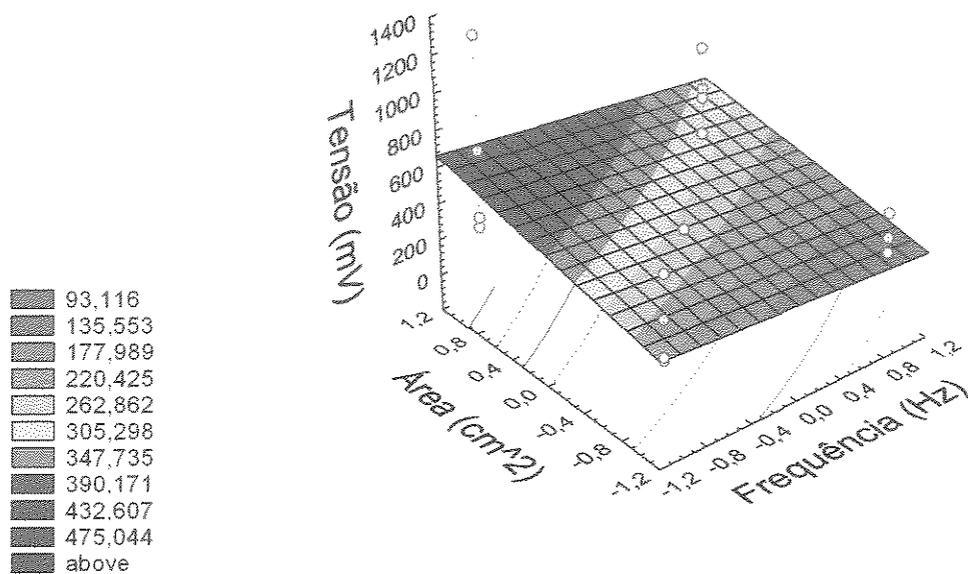
**Tabela 10** - Análise de variância (ANOVA) segundo planejamento

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F <sub>calc</sub>
Regressão	1428012,31	5	285602,46	9,69
Resíduos	412318,64	14	29451,33	
Falta de ajuste	412300,64	11	37481,88	
Erro puro	18	3	6	
TOTAL	1840330,95	19	96859,52	

$$R^2 = 77,6\%$$

$$F_{\text{tabelado}}(0,95;5;14) = 2,96 \text{ (BARROS e BRUNS, 1995).}$$

A análise de variância da variância apresentada na tabela 10 convalida o modelo obtido no experimento, pois o  $F_{\text{calculado}}$  (9,68) é 3 vezes maior que o  $F_{\text{tabelado}}$  (2,96), o que permite dizer que o modelo é satisfatório ( $R^2 = 77,6\%$ ).



**Figura 38** - Superfície de resposta tensão em função da área vs. frequência

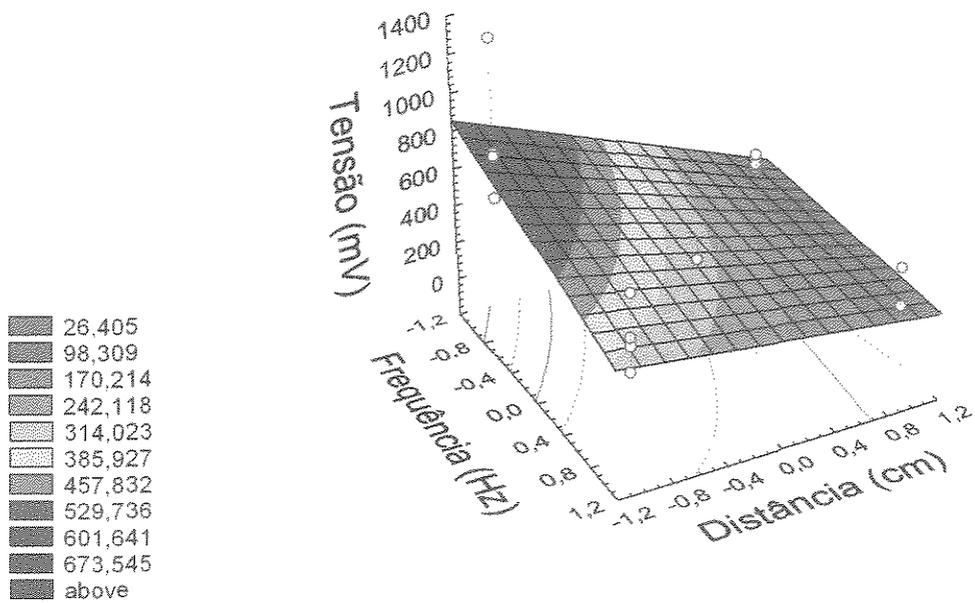


Figura 39 - Superfície de resposta tensão em função da frequência vs. distância

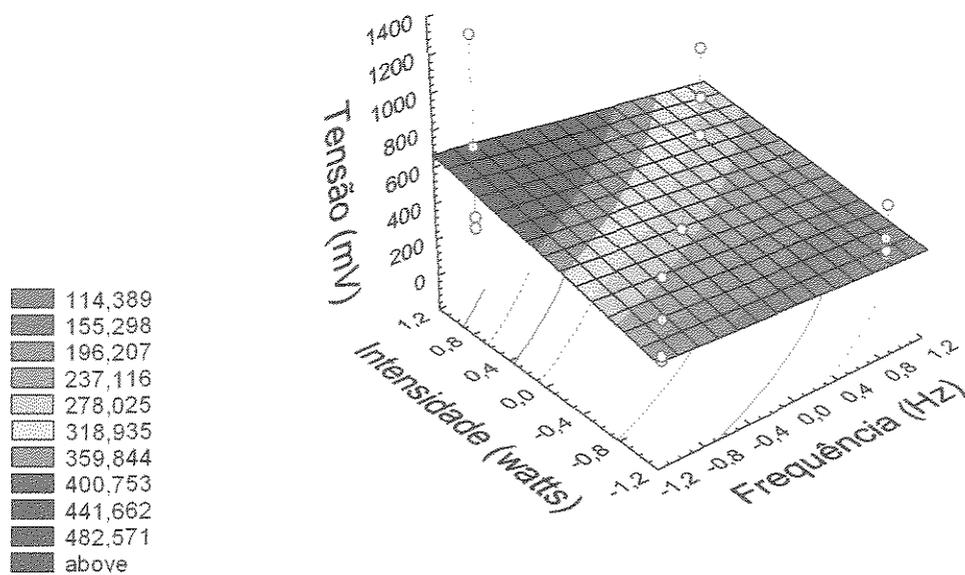


Figura 40 - Superfície de resposta tensão em função da intensidade vs. frequência

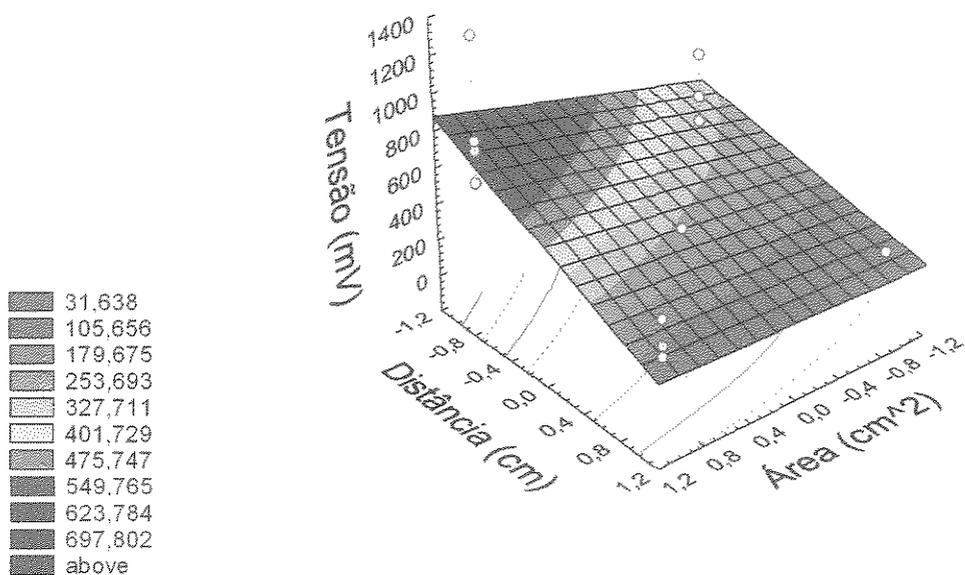


Figura 41 - Superfície de resposta tensão em função da distância vs. área

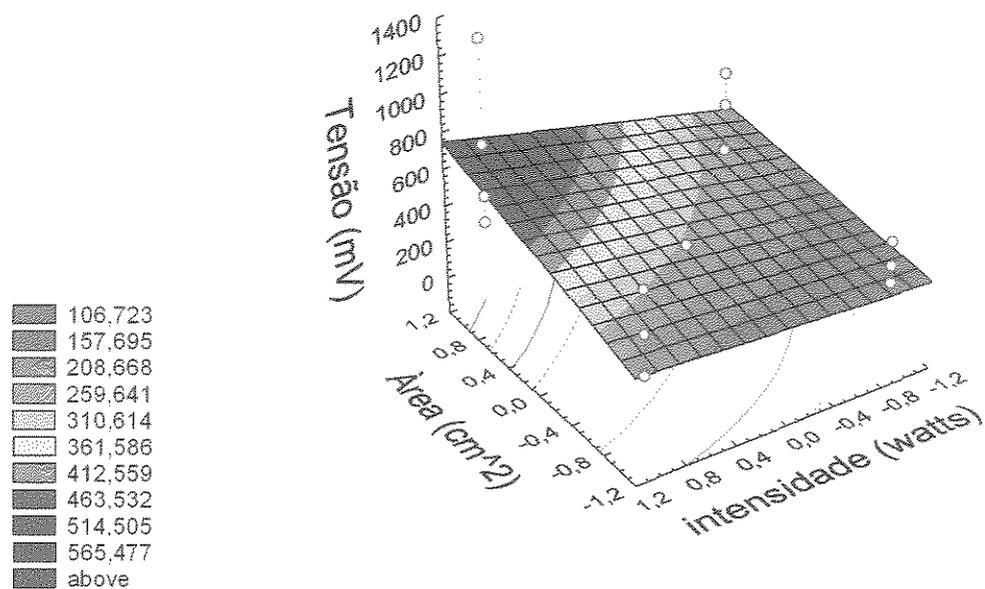
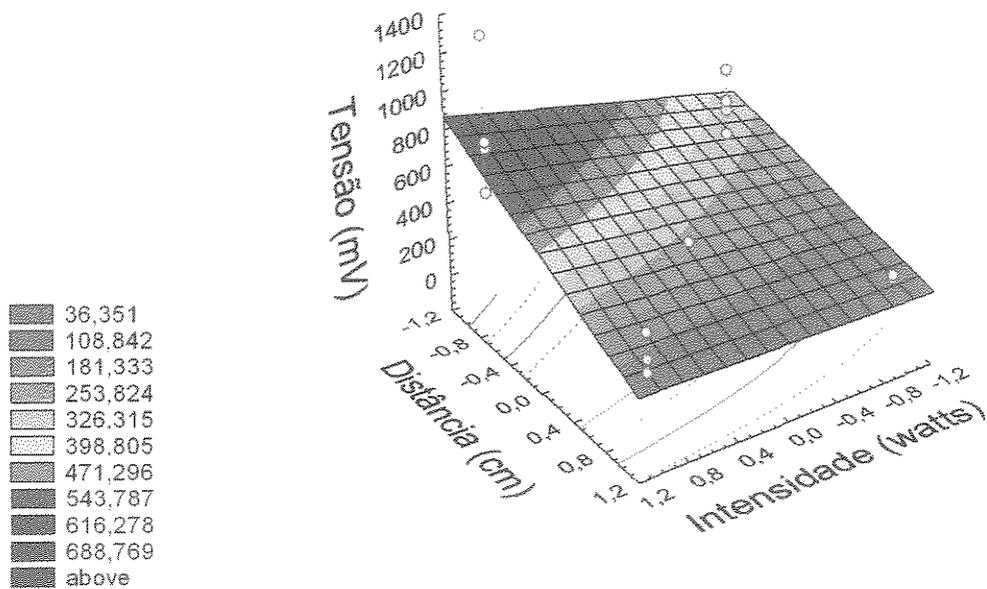


Figura 42 - Superfície de resposta tensão em função da área vs. intensidade



**Figura 43** - Superfície de resposta tensão em função da distância vs. intensidade.

As Figuras 38 a 43 apresentam as superfícies de resposta para as variáveis, onde se nota que assim como no primeiro experimento, a resposta (tensão pico a pico) é intensificada com pequenas distâncias, maiores diâmetros e frequências levemente mais baixas, além de maior intensidade luminosa.

Pode-se observar que mesmo a frequência não se mostrando significativa no modelo, ela apresenta uma influência experimentalmente.

Fazendo-se uma comparação entre o primeiro e segundo experimento, pode-se afirmar que em ambos os experimentos as respostas foram semelhantes no que se refere ao comportamento do sensor em função dos parâmetros utilizados, sendo assim pode-se afirmar que o sensor apresenta uma boa sensibilidade de resposta.

## VII. CONCLUSÕES

Em acordo com os objetivos deste trabalho e dos resultados obtidos, pode se concluir que:

- Constatou-se geração de sinais elétricos, por tanto o dispositivo pode ser utilizado como gerador de energia elétrica (motores de baixa potência elétrica); como detectores de luz com sensibilidade de 8 mV / lux;
- A análise do sinal piroelétrico permitiu uma avaliação quanto à influência da área sensível do detector, estabelecendo condições para orientação quanto à escolha da área a ser utilizada, de acordo com sua aplicação;
- Os parâmetros que mais influenciam no processo são: a área do sensor e a distância. Então, quanto maior a área atingida, e mais perto e direcionado estiver a fonte de radiação, maior será o rendimento do sinal de saída;
- Ocorre uma grande dependência da tensão piroelétrica em relação aos parâmetros utilizados, sendo que os resultados obtidos foram satisfatórios, quando se trabalhou com frequências do “chopper” de 10 Hz, com área do sensor de 1,33 cm<sup>2</sup>, distância lâmpada-sensor de 6 cm e intensidade de 99 watts;
- Para intensidades luminosas maiores, o rendimento do sinal de saída é maior e proporcional ao aumento da intensidade;
- Apesar de estatisticamente a variável frequência não se apresentar significativa, no segundo planejamento, deve-se levar em consideração que os outros parâmetros utilizados podem estar alterando sua influência no modelo, sendo assim a frequência mesmo não se mostrando significativa estatisticamente, deve-se considerar que experimentalmente ela é importante.
- Os resultados do comportamento da tensão piroelétrica em função da frequência de modulação mostram que a partir de um certo valor de frequência (26 Hz), a tensão piroelétrica é praticamente constante, assim pode-se estabelecer regiões de frequência de trabalho para os detectores desenvolvidos.
- Ao lado destes resultados encontrados, recomenda-se que os parâmetros estudados sejam reavaliados para um novo sensor montado, pois pode-se encontrar o melhor

---

ponto de operação do sensor em função da área, frequência de trabalho do “chopper”, distância lâmpada-sensor e intensidade.

## **VIII. SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS**

Pelos resultados obtidos neste trabalho, sugerem-se os seguintes tópicos para futuras pesquisas:

- Procurar otimizar o protótipo, e assim melhorar o rendimento do sensor;
- Estudar os sinais gerados pelo sensor;
- Procurar utilizar os dados obtidos, na montagem de um protótipo de geração de energia;
- Estudar outras formas de utilização de sensores piroelétricos nas diferentes áreas.

**IX. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ATOCHEM, PVDF – *Foraflon*<sup>®</sup>, Catálogo, 2002.

ARNOLD, F., *Pré-Tensionamento Mecânico em Transdutores Piezoelétricos*. Campinas – SP: Departamento de Engenharia Biomédica – Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, p. 1-38, 1995, Tese.

BACHMAN, M. A. and J. B. LANDO, *Macromolecules*, 14, 40, 1980.

BACHMAN, M., GORDON, W.L., WEINHOLD S. and LANDO, J.B., *J. Appl. Phys.*, v. 51, p. 5095, 1980.

BARROS NETO, B., SCARMINIO, I.S., BRUNS, R.E. Otimização e Planejamento de Experimentos, *Campinas: Editora da UNICAMP*, 1995.

BERGMAN, J. G., Jr McFEE, and G. R. CRANE, Pyroelectricity and optical second harmonic generation in polyvinylidene fluoride films, *Appl.Phys.Let*, v. 18 (5), p. 203-205, 1971.

BROADHURST, M. G.; DAVIS, G.T.; Ferroelectrics Polarization in Polymer. *Ferroelectrics*. v. 32, p. 177-80, 1981.

BROADHURST, M. G.; DAVIS, G.T.; McKINNEY, J.E.; COLLINS, R.E. Piezoelectricity and Piryroelectricity Polyvinylidene Fluoride – A Model. *J. Appl. Phys.*, v. 49 (10), p. 4992-97, 1978.

BURFOOT, J. C., *Ferroelectrics*, v. 49, 1967.

CADY, W. G., *Piezoelectricity*, 1946, 699 p., MacGraw Hill.

DAVIS , G.T., McKINNEY, J.E., BROADHURST, M.G. and ROTH, S.C., Electric Field Induced Phase changes in Poly(vinylidene fluoride), *J. Appl. Phys*, v. 49 (10), p. 4998-5002, 1978.

FURLAN, G. F. *Detector Piroelétrico com PVDF e sua Aplicação em Termometria*. Ribeirão Preto – SP. Departamento de Física e Matemática. Universidade de São Paulo, 54 p. 1997.

FURUKAWA, T. Ferroelectrics Properties of Vinylidene Fluoride Copolymers. *Phase Transition*, v. 18, p. 143-211, 1989.

FURUKAWA, T.; DATE, M.; FUKADA, E.; Hysteresis Phenomena in Polyvinylidene Fluoride Under High Electric Field. *J. Appl. Phys.*, v. 51(2), p. 1135-41, 1980.

GALPPERIN, YE. L., YU. V. STROGALIN and M. P. MLENIK, *Vysikomol. Soed.*, v. 7, p. 933, 1965.

GALLETTI, P.M.; De ROSSI, D.E.; De REGGI, A.S. *Medical applications of Piezoelectric Polymer*, Gordon and Breach Science Publisher, v. 5, 1988.

HASEGAWA, R., Y. TAKAHASHI, Y. CHATANI and H. TADOKORO, *Polym. J.*, v. 3, p. 600, 1972.

GRUM, F.; Becherer, R. J., *Optical Radiation Measurements*, 1979, vol. 1, Academic Press.

JIMBO, M.; KOBAYASHI, S.; HORINO, K.; IKEDA, S.; WADA, Y. Analysis of the Hysteresis Curve of Ferroelectric Polymer by a Phenomenological Relaxation Theory. *J. Polym. Sci: Polym. Phys.*, v. 22, p. 2139-44, 1984.

JONA, F. P., Shirane, G., *Ferroelectric Crystals*, 1962.

HUDSON Jr., R. D., *Infrared System Engineering*, 1969, John Wiley and Sons.

KAWAI, H. The Ferroelectricity of Poly(vinylidene Fluoride). *Japan J. Applied. Physics*, v.8, p.975, 1969.

LAWSON, R. N., *Canada Med. Ass. J.*, v. 75, p. 309, 1956.

LOVINGER, A.J. *Developments in Crystalline Polymer-1*, D.C. Basset Ed., Applied Science Publisher, Gordon, 1982.

LUONGO, J. P., *J. Polym. Sci.*, A-2 (10), p. 1119, 1972.

MARCUS, M. A., Ferroelectric polymers and their Applications, *Ferroelectric*, v. 40, p. 29–41, 1982.

NAEGELE, D., YOON, D.Y. and BROADHURST, M.G., *Macromolecules*, v. 11, p. 1297, 1978.

NAKAMURA, K. And Y. WADA, *J. Polym. Sc.*, A-2 (9), p. 161, 1971.

ODON, A. Probe with PVDF Sensor for Energy Measurements of Optical Radiation. *Measurement Science Review*, v. 3, s. 3, p. 111-114, 2003.

PORTER, S. G., A brief Guide to Piroelectric Detector, *Ferroelectrics*, v. 33, p. 193-206, 1981.

PUTLEY, E. H., The Piroelectric Detector, Semiconductor and Semimetals, v. 5, p. 259-283, Academic Press, 1970.

SESSLER, G. M., Pyezoelectricity in Polyvinylidene Fluoride, *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 70 (6), p. 1596-1608, 1981.

SESSLER, G. M.; WEST, J. E. “Electrets”, edited by G. M. Sessler, *Topics in Applied Physics*, v. 33, p. 347-381, Spring, Berlin, 1987.

SINÉZIO, J.C.C. *Novo Triodo Corona e suas Aplicações no Estudo das Propriedades Elétricas do Polímero PVDF*. São Carlos-SP: Instituto de Física e Ciência de Materiais, Universidade de São Paulo, 1990. 102 p. Tese (Doutorado).

SKOOG, A.; HOLLER F.; TIMOTHY A. *Princípios de Análise Instrumental*, 5 ta. Edição, Porto Alegre, 2002.

STATSOFT, Inc. *STATISTICA for Windows* [Computer program manual]. Tulsa, USA, WEB: [www.statsoft.com](http://www.statsoft.com). 2000.

TAMURA, M.; OGASAWARA, K.; ONO, N.; HAGIWARA, S. Piezoelectricity in Uniaxially Poly(Vinylidene Fluoride). *J. Appl. Phys.*, v. 45 (9), p. 3768-71, 1974.

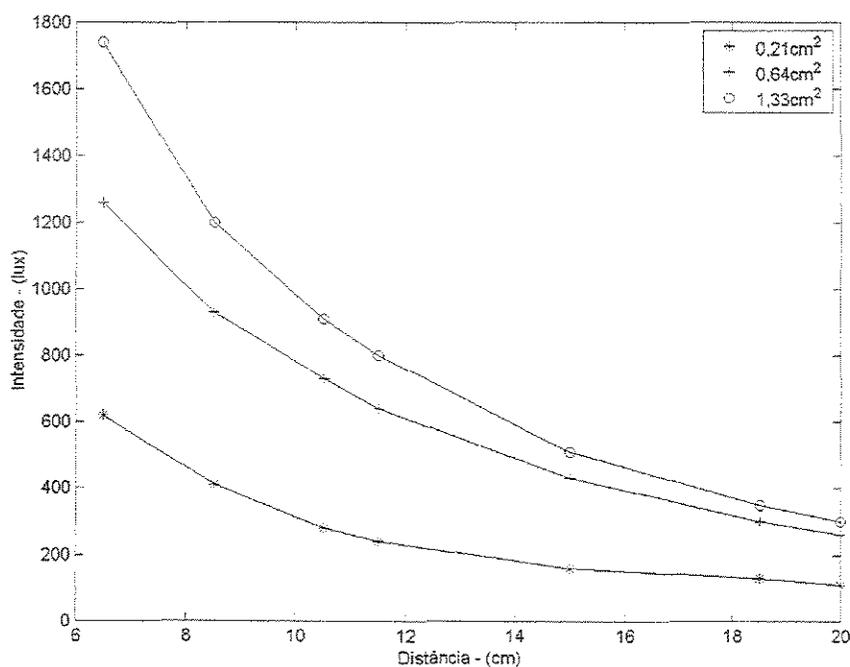
TAKAHASHI, Y. and TADOKORO, H., *Macromolecules*, v. 13, p. 1317, 1980.

WANG, T. T., HERBERT, J. M. and GLASS, A. M., *The Applications of Ferroelectric Polymers*, Blakie & Sons Ltd., 1988.

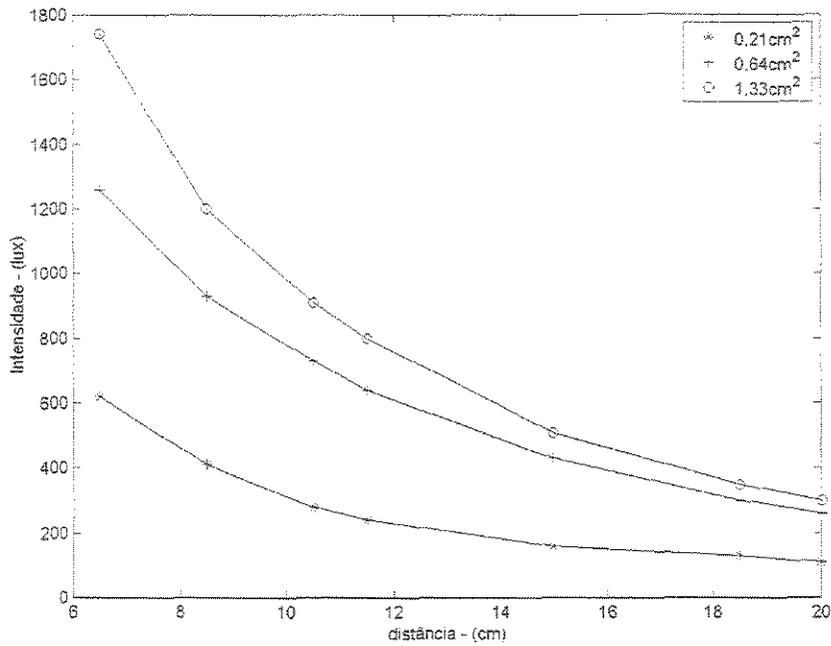
## ANEXOS

## ANEXOS I

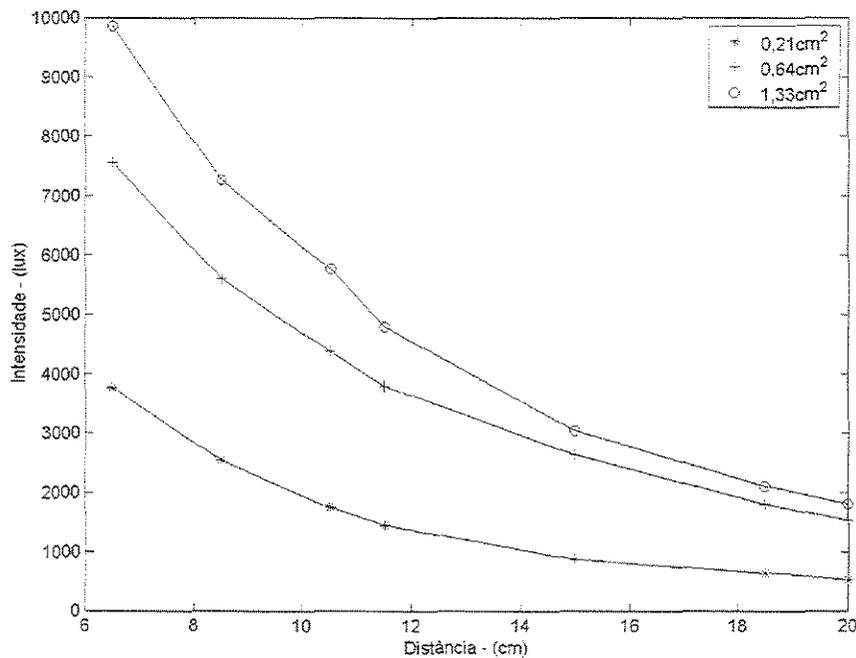
A seguir apresentam-se gráficos de curvas de calibração feitas em função da distância, variando a área do sensor iluminada ( $\text{cm}^2$ ) e a intensidade da lâmpada (watts) tendo como resposta intensidade que atinge a superfície do sensor em lux.



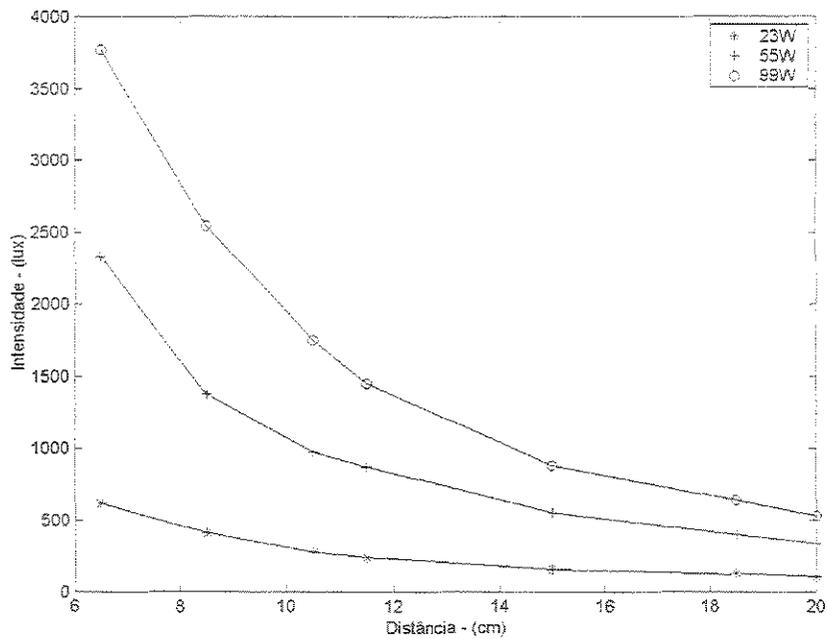
**Figura A.1** – Intensidade (lux) em função da distância lâmpada–sensor, para as diferentes áreas do sensor ( $\text{cm}^2$ ), com uma potência da lâmpada de 23 watts.



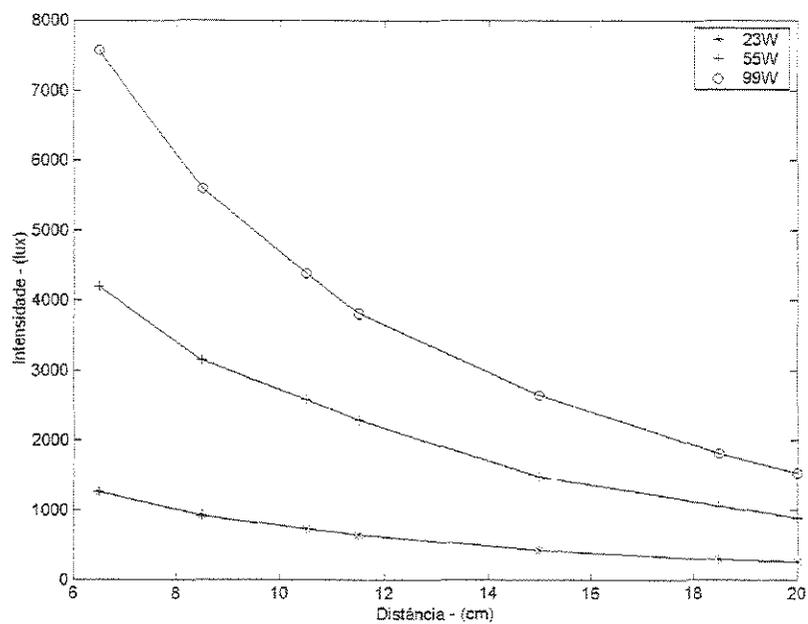
**Figura A.2** – Intensidade (lux) em função da distância lâmpada–sensor, para as diferentes áreas do sensor (cm<sup>2</sup>), com uma potência da lâmpada de 55 watts.



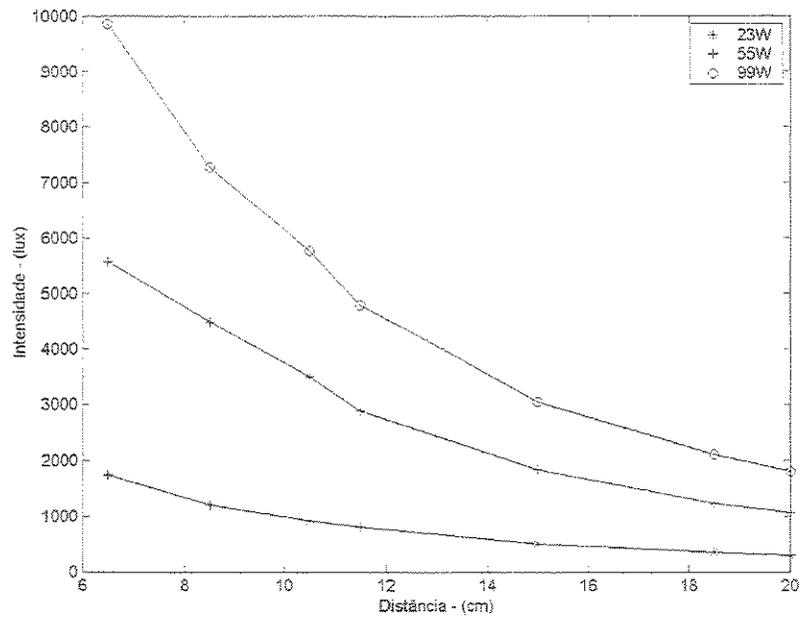
**Figura A.3** – Intensidade (lux) em função da distância lâmpada–sensor, para as diferentes áreas do sensor (cm<sup>2</sup>), com uma potência da lâmpada de 99 watts.



**Figura A.4** – Intensidade (lux) em função da distância lâmpada-sensor, para as diferentes potências da lâmpada (watts), com a área do sensor de  $0,21 \text{ cm}^2$ .



**Figura A.5** – Intensidade (lux) em função da distância lâmpada-sensor, para as diferentes potências da lâmpada (watts), com a área do sensor de  $0,64 \text{ cm}^2$ .



**Figura A.6** – Intensidade (lux) em função da distância lâmpada–sensor, para as diferentes potências da lâmpada (watts), com a área do sensor de  $1,33 \text{ cm}^2$ .

## ANEXO II

As condições e parâmetros utilizados para medir a intensidade de luz que chega à superfície do sensor em lux provenientes da lâmpada são: frequência do “chopper” 10 Hz, distância lâmpada-sensor de 3 cm e intensidade de 99 watts. As áreas utilizadas foram diferentes com a finalidade de observar a sensibilidade e reprodutibilidade do sensor ( $A_1 = 0,21$ ;  $A_2 = 0,64$  e  $A_3 = 1,33 \text{ cm}^2$ ).

Nas medidas realizadas obtiveram-se os seguintes resultados:

$$A_1 = 12500 \text{ lux} / \text{m}^2$$

$$A_2 = 10500 \text{ lux} / \text{m}^2$$

$$A_3 = 6770 \text{ lux} / \text{m}^2$$

As medidas foram obtidas com a ajuda de um luxímetro, sendo assim para cada área do sensor utilizada, obteve-se a seguinte proporção.

$$A_1 = 1,625 \text{ lux} / 1,3 \text{ cm}^2$$

$$A_2 = 0,672 \text{ lux} / 0,64 \text{ cm}^2$$

$$A_3 = 0,14 \text{ lux} / 0,21 \text{ cm}^2$$

sendo assim, os valores em mV obtidos como sinal de resposta levando em consideração que a amplificação já esta sendo descontada em 100 vezes é.

$$A_1 = 13 \text{ mV}$$

$$A_2 = 5,81 \text{ mV}$$

$$A_3 = 1,18 \text{ mV}$$

Tendo esses resultados em mão, passou-se a calcular a sensibilidade do sensor:

$$SS = x \text{ mV(saída)} / y \text{ lux (incidência)}$$

---

Onde SA é a sensibilidade do sensor, assim as sensibilidades encontradas para cada caso são:

$$SSA_1 = 8 \text{ mV / lux}$$

$$SSA_2 = 8,6 \text{ mV / lux}$$

$$SSA_3 = 8,4 \text{ mV / lux}$$

Observando os resultados obtidos, pode se perceber que os valores encontrados para as diferentes áreas, são aproximadamente iguais, com isso constata-se que a sensibilidade do sensor é boa, para estes fins.