

Síntese, Caracterização, Modelagem e Desenvolvimento de um Fotodetector Microcontrolado Utilizando Filmes de Dióxido de Estanho

Nilo Lima Matias

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia para o preenchimento de requisitos parciais à obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Informação e Energia

Profº. Dr. Márcio Fontana
Orientador

Salvador, Bahia, Brasil
©Nilo Lima Matias, Agosto de 2009

Síntese, Caracterização, Modelagem e Desenvolvimento de um Fotodetector Microcontrolado Utilizando Filmes de Dióxido de Estanho

Nilo Lima Matias

Dissertação de Mestrado apresentada em Agosto de 2009

Profº. Dr. Márcio Fontana
Orientador

Aprovada por:

Profº. Dr. Márcio Fontana (DEE - UFBA)

Profº. Dr. Amauri Oliveira (DEE - UFBA)

Profº. Dr. Helder José Ceragioli (FEEC-UNICAMP)

Salvador, Bahia, Brasil, Agosto de 2009

Dedicatória

Aos meus pais Antônio e Nancy e aos meus irmãos.

Agradecimentos

A Deus, pelo dom da vida e por sempre iluminar o meu caminho.

A todos os meus familiares, especialmente aos meus pais Antônio e Nancy, pelos exemplos de vida e apoio incondicional.

A Ana Paula pelo carinho e compreensão.

Ao professor Márcio Fontana, pela oportunidade de realizar este trabalho, pelo incentivo e dedicação durante todo o seu desenvolvimento.

Aos colegas de trabalho da Globaltek pelo apoio e compreensão nos momentos de ausência.

Aos amigos do DEE, em especial aos colegas Márcio, Aiese e Fabiano pela amizade, contribuições e troca de informações.

Aos mestres pelos seus ensinamentos e a todos os funcionários do PPGEE e do DEE.

Ao Laboratório de Semicondutores, Instrumentos e Fotônica (*LABSIF*) da Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da UNICAMP pela caracterização Raman e microscopia de força atômica.

A todos os que não constam nesta nota, mas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho e desejaram o seu sucesso.

Resumo

Nesse trabalho estuda-se as características físico-químicas de filmes de dióxido de estanho (SnO_2) poroso nanoestruturado sintetizados em uma plataforma de baixo custo construída em laboratório utilizando a técnica de *spray*. A sensibilidade ao oxigênio é investigada em uma plataforma experimental para estudo da otimização dos parâmetros de deposição. A sensibilidade da sua condutividade elétrica à temperatura, umidade, pressão e luz também são caracterizadas e um modelo matemático é obtido para descrever a dependência térmica, e ótica na faixa do espectro visível. A caracterização morfológica e química do filme são apresentadas utilizando técnicas de Microscopia de Força Atômica (MFA) e espectroscopia Raman respectivamente. O protótipo de um circuito fotodetector microcontrolado com compensação da temperatura é apresentado ao final do trabalho revelando a potencialidade do material para novas aplicações na área de sensores e materiais.

Abstract

This work presents the physical-chemical properties characterizations of tin dioxide (SnO_2) thin films obtained by spray deposition with a low cost experimental setup built in laboratory. The sensitivity to oxygen exposure is investigated to determine the optimum deposition parameters. Its electrical conductivity with regards to temperature, humidity, pressure and light are also characterized and a mathematical model is proposed to describe the dependence to temperature and incident light intensity. Morphological and chemical properties are studied with Atomic Force Microscopy and Raman spectroscopy respectively. A microcontrolled photodetector prototype with temperature compensation is presented revealing potential new applications on sensor and materials field.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Considerações preliminares	2
1.1.1	Visão Geral dos filmes de SnO_2	2
1.1.2	Objetivos e contribuições	4
1.1.3	Motivação do trabalho	4
1.2	Técnica para obtenção de filmes de SnO_2	5
1.3	Técnicas de caracterização das propriedades físico-químicas	7
1.3.1	Análise morfológica	7
1.3.2	Análise de micro-Raman	8
1.3.3	Plataforma RG - Caracterização Resistência <i>versus</i> Concentração de Gás	10
1.3.4	Plataforma RT - Caracterização Resistência <i>versus</i> Temperatura	12
1.3.5	Plataforma RL - Caracterização Resistência <i>versus</i> Luz	12
1.4	Sinopse dos capítulos	14
2	Estudo da otimização dos parâmetros do processo de <i>spray</i>	16
2.1	Introdução	16
2.2	Procedimento experimental	17
2.3	Resultados e discussão	19
2.4	Conclusões	23
3	Caracterização e modelagem do filme de SnO_2	24
3.1	Introdução	24
3.2	Procedimento experimental	28
3.3	Resultados e discussão	32
3.3.1	Caracterização e modelagem da propriedade térmica	32
3.3.2	Caracterização e modelagem da propriedade de fotossensibilidade	33

3.3.3	Caracterização dinâmica do filme de SnO_2	36
3.4	Conclusões	41
4	Desenvolvimento de um fotodetector microcontrolado utilizando SnO_2	44
4.1	Introdução	44
4.2	Procedimento experimental	46
4.2.1	Visão geral do sistema de medição	46
4.2.2	Implementação do software	55
4.3	Resultados e discussão	56
4.4	Conclusões	57
5	Conclusões	58
A	Fluxograma das rotinas do microcontrolador do circuito fotodetector	60
B	Programa do microcontrolador do circuito fotodetector	65
	Bibliografia	100

Lista de Símbolos e Abreviaturas

<i>AD</i>	: Analógico-Digital
<i>ADC</i>	: conversor analógico-digital
<i>Ar</i>	: elemento químico argônio
<i>C₂H₅OH</i>	: etanol
<i>CdS</i>	: sulfeto de cádmio
<i>CdSe</i>	: seleneto de cádmio
<i>CdTe</i>	: telureto de cádmio
<i>CISC</i>	: <i>complex instruction set core</i>
<i>CNTP</i>	: Condições Normais de Temperatura e Pressão
<i>CVD</i>	: deposição por vapor químico
<i>dB</i>	: decibel
<i>EEPROM</i>	: <i>electrically erasable programmable read only memory</i>
<i>FAPESB</i>	: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia
<i>FCL</i>	: Frequência de Chaveamento da Luz
<i>FPB</i>	: Filtro Passa Baixas
<i>GPB</i>	: <i>General Purpose Interface Bus</i>
<i>Hz</i>	: Hertz
<i>HgCdTe</i>	: telureto de cádmio e mercúrio
<i>IDE</i>	: <i>Integrated Development Environment</i>
<i>IEC</i>	: <i>International Electrotechnical Commission</i>
<i>InSb</i>	: antimoneto de índio
<i>InGaAs</i>	: arseneto de índio gálio
<i>InAs</i>	: arseneto de índio
<i>K</i>	: kelvin
<i>LABSIF</i>	: Laboratório de Semicondutores, Instrumentos e Fotônica
<i>LAPO</i>	: Laboratório de Propriedades Óticas
<i>LCD</i>	: <i>Liquid Crystal Display</i>
<i>LDR</i>	: <i>Light Dependent Resistor</i>
<i>LED</i>	: Diodo emissor de luz

<i>MCT</i>	: telureto de cádmio e mercúrio
<i>MCU</i>	: <i>Microcontroller Unit</i>
<i>MFA</i>	: Microscopia de Força Atômica
<i>NTC</i>	: <i>Negative Temperature Coefficient</i>
$^{\circ}\text{C}$	: grau Celsius
O_2	: oxigênio
<i>PbS</i>	: sulfeto de chumbo
<i>PbSe</i>	: seleneto de chumbo
<i>PbTe</i>	: telureto de chumbo
<i>PID</i>	: controlador diferencial integrador e proporcional
<i>ps</i>	: pico segundo
<i>PTC</i>	: <i>Positive Temperature Coefficient</i>
<i>RAM</i>	: <i>Random Access Memory</i>
<i>ROHS</i>	: <i>Restriction of Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment</i>
<i>RISC</i>	: <i>Reduced Instruction Set Core</i>
<i>ROM</i>	: <i>Read Only Memory</i>
<i>Rs</i>	: resistência elétrica do filme de SnO_2
<i>RTD</i>	: <i>Resistance Temperature Detector</i>
<i>Si</i>	: silício
σ^2	: desvio padrão
$\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	: tetracloreto de estanho pentahidratado
SnO_2	: dióxido de estanho
<i>SnO</i>	: óxido de estanho
$\text{Sn}(\text{OH})_2$	: hidróxido estanoso
$\text{Sn}(\text{OH})_4$	: hidróxido estânico
<i>TEM</i>	: módulo termoeletrônico
<i>TTL</i>	: <i>Transistor Transistor Logic</i>
<i>ULA</i>	: Unidade Lógica Aritmética

Lista de Tabelas

2.1	Localização dos picos de micro-Raman dos compostos de estanho [1]. . . .	17
2.2	Grupo 1 - Temperatura variável.	18
2.3	Grupo 2 - Concentração da solução depositada variável.	18
2.4	Grupo 3 - Fluxo do gás de arraste variável.	18
3.1	Parâmetros característicos de LDRs de CdS	26
3.2	Parâmetros da resposta dinâmica do filme de SnO_2	40
4.1	Alarmes de temperatura	51
4.2	Tabela de parâmetros para compensação da temperatura	53
4.3	Resultado de medição de frequência usando o circuito fotodetector	56

Lista de Figuras

1.1	Adsorção do O_2 à superfície do filme de SnO_2	2
1.2	Ilustração do sistema de deposição de SnO_2 poroso.	6
1.3	Detalhes construtivos da plataforma de pulverização química.	7
1.4	Esquema básico do posicionamento da ponta de prova e de sua varredura sobre a superfície da amostra para a coleta de dados ponto a ponto da superfície.	8
1.5	Bancada experimental para caracterização da expectroscopia de micro-raman.	9
1.6	Esquema simplificado da plataforma RG.	10
1.7	Detalhes da câmara de vácuo da plataforma RG.	11
1.8	Detalhes da plataforma RT: (A) Medidor de quatro pontas, (B) modulo termo elétrico (TEM), (C) TEM montado sobre o dissipador.	13
1.9	Plataforma de caracterização dinâmica do filme de SnO_2	14
1.10	Plataforma de caracterização RL	15
2.1	Curva típica da fotossensibilidade da resistência elétrica do filme de SnO_2	19
2.2	Variação da sensibilidade da resistência do filme de SnO_2 com a temperatura de deposição.	20
2.3	Sensibilidade de filmes de SnO_2 poroso.	21
2.4	Espectro Raman típico das amostras de SnO_2 depositados pelo processo de pulverização química.	22
2.5	Imagem tridimensional típica de MFA da amostra de SnO_2 depositada sobre substrato de silício.	22
2.6	Perda de sensibilidade de filmes de SnO_2 com a exposição ao oxigênio.	23
3.1	Característica típica do CdS	25
3.2	Caracterização espectral típica do PbS , $PbSe$ e MCT	27
3.3	Simbologia utilizada para representação em circuitos eletrônicos.	27
3.4	Esquema simplificado do conversor tensão-corrente.	28

3.5	Temperatura de referência (vermelho), temperatura medida (preto).	29
3.6	Esquema do circuito em ponte conversor R/V.	30
3.7	Curva típica da resposta do filme de SnO_2 à variação da temperatura. . . .	32
3.8	Curva típica da resposta do filme à variação da temperatura e curva do modelo obtido.	33
3.9	Curva típica da resposta do filme de SnO_2 ao chaveamento de luz visível. .	34
3.10	Caracterização da fotossensibilidade em ambiente controlado.	35
3.11	Curva característica da resistência elétrica com a intensidade de luz e tem- peratura.	37
3.12	Modelo aproximado para a curva característica da resistência elétrica a $20^\circ C$. .	37
3.13	Imagem de MFA de uma amostra depositada a $350^\circ C$, que representa a morfologia típica das amostras reveladas por MFA.	38
3.14	Caracterização dinâmica do filme. Entrada em degrau da luz (o) e saída do circuito em ponte (+).	39
3.15	Modelo polinomial da variação da saída em função da temperatura.	40
3.16	Caracterização dinâmica do filme. Entrada senoidal da luz (o) e saída do circuito em ponte (+) com temperatura do filme = $25^\circ C$	42
3.17	Resposta em frequência do filme de SnO_2	43
4.1	Arquitetura de um sistema de medição.	45
4.2	Visão geral do sistema de medição do fotodetector.	47
4.3	Sistema de Medição da Temperatura.	48
4.4	Curva característica do LM35 (o) e do circuito amplificador (+)	48
4.5	Circuito conversor do sinal do sensor de temperatura.	49
4.6	Temperatura do filme $[p^o (+)]$, e o valor digitalizado $\tilde{Y}$ (o).	51
4.7	Erro do cálculo da temperatura ($[p^o - \hat{p}]$).	52
4.8	Sistema de medição a frequência da luz.	52
4.9	Resposta do filme de SnO_2 ao chaveamento da luz.	53
4.10	Resposta do circuito conversor R/V.	53
4.11	Circuito típico de tratamento analógico de fotocélulas.	54
4.12	Resposta do circuito analógico e saída TTL	54
4.13	Esquema do circuito fotodetector microcontrolado	55
A.1	Fluxograma das rotinas <i>Início</i> e <i>Main</i>	60
A.2	Fluxograma da rotina de conversão AD.	61
A.3	Fluxograma da rotina de medição de temperatura.	62

A.4	Fluxograma da rotina de compensação de temperatura.	63
A.5	Fluxograma da rotina de medição de frequência.	64

Capítulo 1

Introdução

Este capítulo introdutório está dividido em quatro tópicos:

- considerações preliminares;
- conceitos e definições;
- técnica para obtenção de filmes;
- técnicas de caracterização físico-química;
- sinopse dos capítulos.

O primeiro tópico trata de temas gerais da dissertação como a descrição dos objetivos e a introdução de alguns assuntos que são utilizados no decorrer deste trabalho.

O tópico "conceitos e definições" apresenta, de forma sucinta, os principais conceitos e definições que são utilizadas no desenvolvimento desta dissertação.

O tópico "técnica para obtenção de filmes" trata, especificamente, da técnica de pulverização química utilizada na deposição do SnO_2 .

No tópico "técnicas de caracterização físico-química" são apresentados as principais técnicas de caracterização das propriedades físico-química dos filmes de SnO_2 .

Uma descrição resumida dos principais temas discutidos nos próximos capítulos, fornecendo uma visão global do conteúdo deste trabalho, é apresentado no tópico "sinopse dos capítulos".

1.1 Considerações preliminares

1.1.1 Visão Geral dos filmes de SnO_2

O SnO_2 apresenta-se na natureza na forma de mineral - cassiterita. É um metal óxido semicondutor tipo n com banda de energia de ativação aproximadamente de 3,6 eV. Possui alta condutividade e alta transparência na região visível e alta refletividade para a região do infravermelho.

Quando aquecido a certas temperaturas, a exposição ao oxigênio atmosférico reduz sensivelmente sua condutividade elétrica devido à adsorção desta espécie ocasionando a remoção de elétrons da banda de condução. A reação é descrita na equação 1.1:



A Figura 1.1 ilustra esta reação. Uma barreira de potencial é formada entre os grãos da superfície do filme de SnO_2 , impedindo o movimento livre dos portadores de carga.

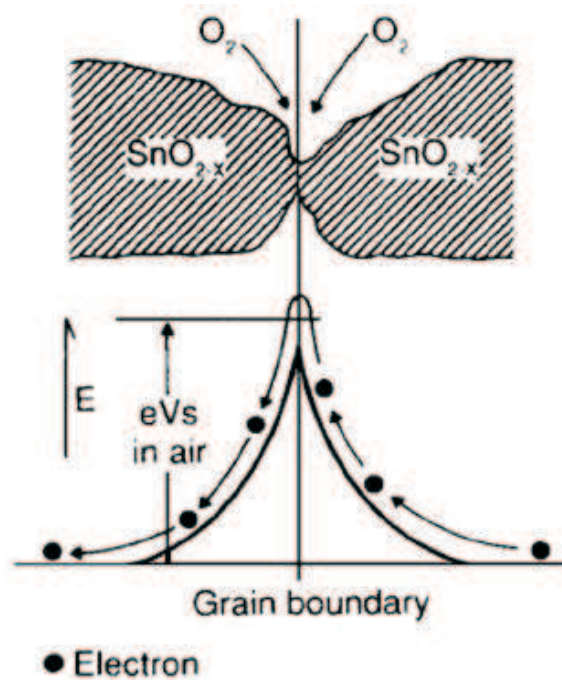


Figura 1.1: Adsorção do O_2 à superfície do filme de SnO_2 .

Esta barreira de potencial está associada à resistência elétrica do filme. Outros gases oxidantes, tais como o NO_2 , também influenciam na superfície do filme, aumentando a sua resistência. Yamazoe *et al.* [2] generalizam esta reação conforme equação 1.2:



Os gases redutores, por exemplo, CO e H_2 também sensibilizam a resistência do filme. A reação destes gases com o O_2 adsorvido reduz a densidade de íons negativos, provocando a redução da barreira de potencial (resistência elétrica).

Estas características estimularam a utilização de filmes de SnO_2 na fabricação de micro sensores de gases [9,3–8,10,11]. Wang *et al.* [12] obtiveram sensores com alta sensibilidade e rápida resposta para detecção de amônia e etanol a partir da síntese de nanotubos de SnO_2 utilizando método sol-gel.

Muitos estudos têm sido apresentados para caracterizar a resposta da resistividade elétrica destes sensores em função da concentração do gás de interesse desde a sua primeira proposta em 1962 por Seyama e Taguchi. Tal característica é dada por:

$$R = a \cdot P^n \quad (1.3)$$

Em que a e n são constantes; R é a resistência do sensor e P é a pressão parcial do gás de interesse.

Yamazoe *et al.* [2] apresentam uma abordagem teórica deste modelo. Chaiyboun *et al.* [13] desenvolveram um modelo logarítmico multi-paramétrico para detecção de misturas de gases utilizando um sensor de SnO_2 de filme fino.

Os filmes finos de dióxido de estanho utilizados como sensores eletrônicos de gás têm sido preparados por inúmeras técnicas de deposição. Destacam-se, deposição química a partir da fase vapor (CVD) [14,15], pulverização química [16–18], evaporação a vácuo, bombardeamento iônico (sputtering) [19], deposição química líquida, deposição tipo sol-gel [17,20]. Segundo Baranauskas *et al.* [21], o processo CVD apresenta um bom controle dos parâmetros de deposição, baixa temperatura de deposição e baixo custo. Essas características tornam o processo CVD de fácil integração entre os dispositivos de SnO_2 e a tecnologia de silício. A técnica de pulverização química, para a deposição de filmes anti-reflexão de SnO_2 em células solares de silício texturizado, demonstrou-se eficiente independentemente da técnica de texturização da superfície da lâmina de silício [16].

Os filmes de SnO_2 foram inicialmente aplicados na construção de sensores de gases e células solares. No entanto, atualmente, os filmes de SnO_2 são explorados em diferentes aplicações destacam-se: células solares [16–18], nanofitas, nanocorreias, entres outras.

1.1.2 Objetivos e contribuições

O objetivo deste trabalho é mostrar o desenvolvimento de um fotodetector utilizando filmes de dióxido de estanho a partir da síntese do filme, caracterização das propriedades físico-químicas e modelagem das propriedades de interesse para o fotodetector. Dessa forma, pretende-se dar prosseguimento às investigações sobre sensores e atuadores desenvolvidos no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia.

As principais contribuições deste trabalho são:

- caracterização da sensibilidade ao oxigênio;
- caracterização e modelagem do comportamento térmico do SnO_2 ;
- caracterização da propriedade de fotossensibilidade do filme de SnO_2 e
- desenvolvimento de um circuito fotodetector utilizando SnO_2 .

Os objetivos específicos para a realização destas contribuições são:

1. estudar as propriedades físico-químicas dos filmes de SnO_2 para detectar possíveis aplicações na área de sensores;
2. construir a plataforma experimental de pulverização química;
3. montar uma plataforma experimental de caracterização das propriedades de fotossensibilidade, térmica e sensibilidade ao oxigênio;
4. sugerir novas direções para aplicações dos filmes de SnO_2 como novos sensores para a engenharia.

1.1.3 Motivação do trabalho

A descoberta de novos materiais é sempre associada a um conjunto de novas perspectivas de aplicação. Essas perspectivas são, de modo geral, relacionadas com a tentativa de superação de algum problema tecnológico.

Os filmes de SnO_2 são tipicamente utilizados em sensores de gás e células solares. No entanto, não foi encontrado na literatura que teve-se acesso, nenhuma aplicação do filme de SnO_2 com aplicação na detecção de luz, em especial, em luz visível. Dessa forma, o interesse científico e tecnológico para obter novas informações sobre os filmes de SnO_2 necessárias para o desenvolvimento de novas tecnologias na área de sensores sensíveis a luz com alta eficiência e confiabilidade são a grande motivação deste trabalho.

1.2 Técnica para obtenção de filmes de SnO_2

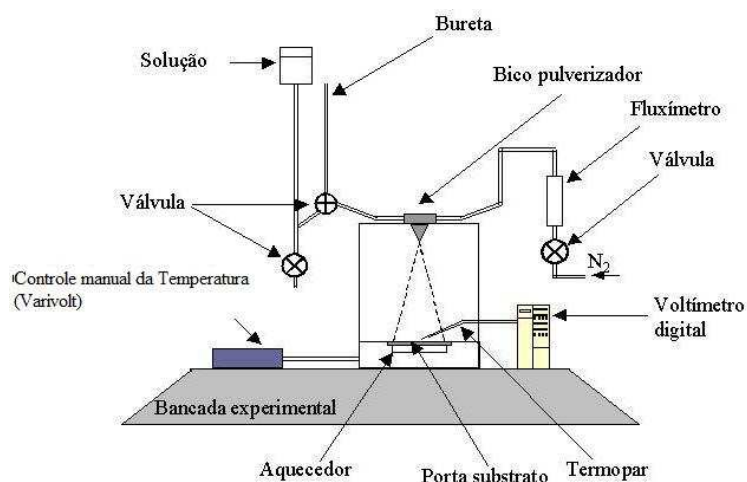
Os processos de deposição de filmes são constantemente melhorados e modificados. A técnica utilizada para realizar a deposição dos filmes de SnO_2 foi a pulverização química. Este método foi escolhido devido à simplicidade e baixo custo de construção de uma bancada de deposição já disponível no Laboratório de Filmes Nanoestruturados da UFBA. O substrato utilizado foi o silício obtido a partir de uma bolacha de Si cortada no laboratório manualmente utilizando-se uma punção. O tamanho das amostras não apresenta uniformidade devido à precisão do método de corte utilizado, variando entre 10 e 25 mm aproximadamente em formato poligonal. A solução de pulverização é preparada a partir da diluição de tetracloreto de estanho pentahidratado ($SnCl_4 \cdot 5H_2O$ 98% da Alfa Aesar) em álcool etílico (C_2H_5OH da Merck).

A plataforma de pulverização química, ver Figura 1.2(a) consiste de um forno aberto na parte superior (permitindo a exaustão de gás), com uma porta dianteira (não está sendo mostrada na figura 1.2(a)). Na parte inferior há uma chapa de aço 310 sobre o qual é posto o substrato. O forno e o substrato são aquecidos até a temperatura de deposição por meio de uma resistência elétrica de 4 kW sob a chapa com capacidade para 1200 °C. Esta placa foi adquirida em placa refratária de cerâmica nas dimensões de 300x200mm, conforme ilustração na Figura 1.2(b).

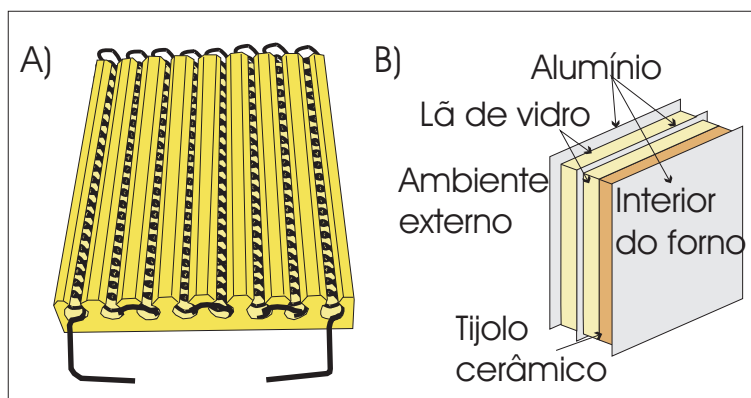
Acima da chapa e centralizado fica o bico pulverizador, mostrado na Figura 1.2(a) com as conexões para entrada de gás e de solução. O jato de *spray* atinge a chapa uniformemente em uma área circular mais do que suficiente para cobrir o substrato. É possível obter mais de uma amostra a cada deposição, sendo que foi adotado como padrão, a deposição de duas amostras por vez. O tempo de deposição foi variado entre 30 e 90 segundos, sendo que as amostras com tempo de deposição de 30 segundos apresentaram resultados satisfatórios na caracterização da propriedade da fotossensibilidade que será apresentada no Capítulo 3. Desta maneira, a maioria das amostras foi obtida com o tempo de deposição de 30 segundos. Não foi realizada nenhuma investigação sobre a correlação entre o tempo de deposição e a espessura do filme.

No laboratório o forno opera fechado dentro de uma capela com exaustor ligado, assim temos a retirada do gás aquecido através da parte superior do forno direto para o exterior, e como as paredes do forno garante o gradiente de temperatura, o aquecimento do laboratório é reduzido. Um termopar do tipo K (cromel-alumel) é utilizado para medir a temperatura de deposição dos filmes de SnO_2 .

O processo de deposição foi otimizado posteriormente substituindo-se a resistência



(a) Plataforma de pulverização química para deposição de filmes.



(b) - (A) Resistência elétrica em molde refratário e (B) Estrutura em camadas da parede do forno.

Figura 1.2: Ilustração do sistema de deposição de SnO_2 poroso.

elétrica por outra resistência de menor potência e menor área. Isto reduziu o entupimento observado no bico pulverizador devido à cristalização da solução provocada pelo aquecimento excessivo do forno.

A Figura 1.3 ilustra alguns detalhes construtivos da plataforma de pulverização química para a deposição de filmes de SnO_2 .



Figura 1.3: Detalhes construtivos da plataforma de pulverização química.

Para reduzir as perdas de calor para o ambiente as paredes do forno foram construídas em camadas. Na Figura 1.2(b) tem-se um esquema simplificado da sua composição em algumas partes do forno. O alumínio apesar de ser um bom condutor de calor e ter baixo ponto de fusão em torno de $660^{\circ}C$ foi usado devido à facilidade de trabalho e serve para separar as partes e moldar o forno. Na parte mais interna há tijolo cerâmico para reter o calor, as outras camadas são de fibra de vidro isolante térmico.

1.3 Técnicas de caracterização das propriedades físico-químicas

1.3.1 Análise morfológica

Os estudos morfológicos das amostras de filmes porosos realizados por microscopia de força atômica (*MFA*) foram realizados com o Nanoscope II que foi disponibilizado ao grupo por cortesia do Laboratório de Semicondutores, Instrumentos e Fotônica (*LABSIF*) da Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da *UNICAMP*.

A Figura 1.4 ilustra o princípio do funcionamento da MFA. Um cristal, de forma pontiaguda, é ligado no vértice de uma micro-viga com balanço em forma de "V". A micro-viga

tem uma constante elástica conhecida, e é flexionada pelas forças de atração e repulsão entre a amostra e a ponta, devido a variação vertical da superfície da amostra. Um circuito de realimentação permite que a cerâmica piezoelétrica mantenha a ponta com uma força constante (para obter a informação da altura) ou altura constante (para obter a informação da força) acompanhando a superfície da amostra. Sobre o cristal é colocado um sensor de deflexão para registrar a variação vertical da superfície da amostra, que ocorre durante a varredura. A força utilizada é da ordem de grandeza das forças interatômicas (cerca de 10^{-9} Newton), o que leva esta técnica de análise ser comumente denominada de "Microscopia de Força Atômica" [22].

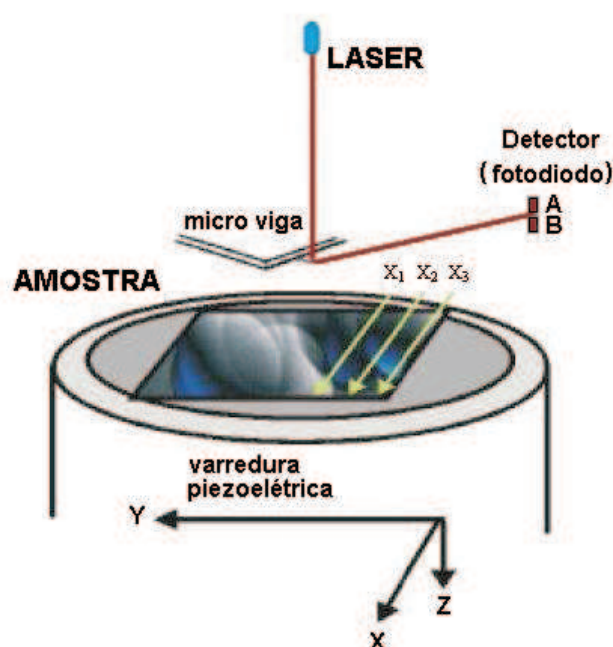


Figura 1.4: Esquema básico do posicionamento da ponta de prova e de sua varredura sobre a superfície da amostra para a coleta de dados ponto a ponto da superfície.

1.3.2 Análise de micro-Raman

A espectroscopia Raman é uma técnica fotônica de alta resolução que proporciona, em poucos segundos, informação química e estrutural de um grupo grande de materiais (compostos orgânicos ou inorgânicos) permitindo a sua identificação. Sua análise se baseia na luz, monocromática de determinada frequência, dispersada ao incidir sobre o material a ser estudado, cuja maior parte da luz dispersada também apresenta a mesma frequência daquela incidente. Somente uma pequena porção da luz é dispersada inelasticamente frente

as rápidas mudanças de frequência, devido à interação da luz com a matéria, e é uma característica intrínseca do material analisado e independe da frequência da luz incidente. A luz que manteve a mesma frequência da incidente não revela qualquer informação sobre o material e é chamada de dispersão Rayleigh, mas aquela que mudou revela a composição molecular deste mesmo e é conhecido como dispersão Raman. A Figura 1.5 ilustra o bancada típica de espectroscopia micro-Raman.

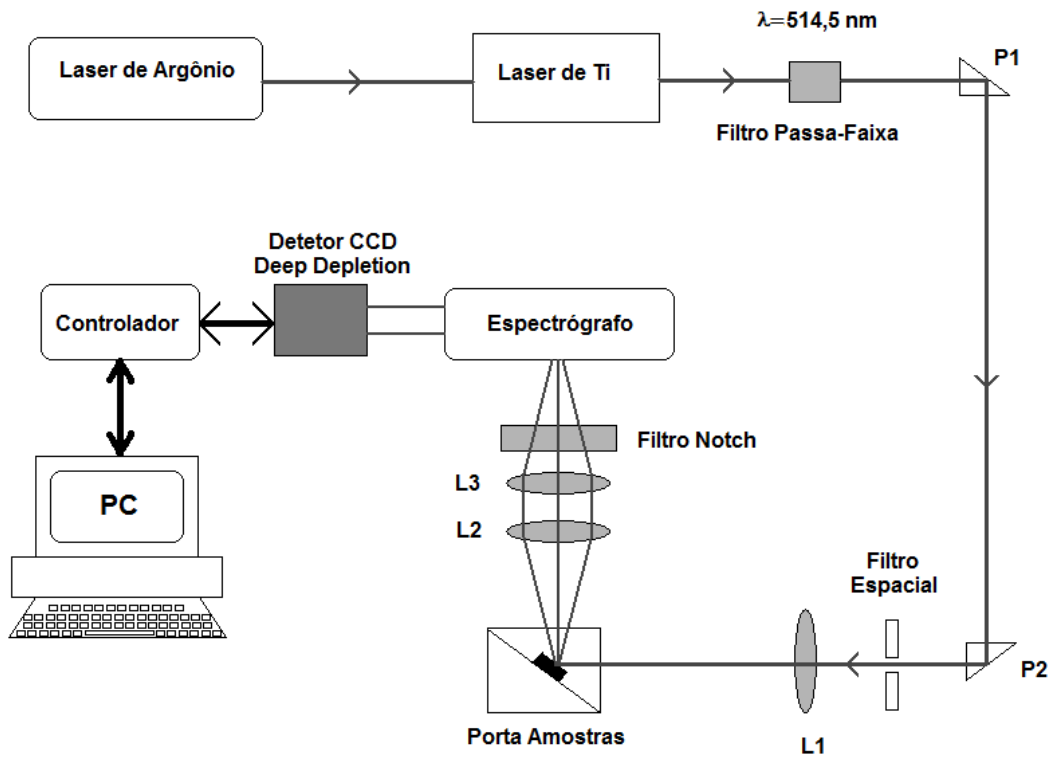


Figura 1.5: Bancada experimental para caracterização da espectroscopia de micro-Raman.

As espectroscopias de micro-Raman com alta resolução espacial foram realizadas usando espectrômetros que operam a temperatura ambiente. Um laser de Ar^+ ($\approx 5mW$) foi utilizado como fonte de excitação ($\lambda = 514,5nm$) para as medidas de micro-Raman que foram realizadas no espectrômetro *RENISHAW - inVia Raman Microscope* que foi disponibilizada ao grupo por cortesia do Laboratório de Semicondutores, Instrumentos e Fotônica (*LABSIF*) da Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da *UNICAMP*.

1.3.3 Plataforma RG - Caracterização Resistência *versus* Concentração de Gás

Para caracterizar a sensibilidade da resistência dos filmes de SnO_2 com a variação da concentração gasosa, faz-se variar periodicamente a concentração do gás de interesse, enquanto mede-se a resistência do filme. A plataforma construída para esta caracterização foi denominada de plataforma RG ilustrada na Figura 1.6. Esta plataforma consiste de uma câmara de vácuo em que se controla a concentração de gás por meio do fluxo relativo de dois gases, ou seja, a concentração relativa do gás de interesse é igual ao fluxo relativo entre esse gás e o fluxo total. A escolha dos gases deve ser tal que, o filme seja sensível a um deles (gás cuja sensibilidade do filme se deseja estudar) e absolutamente insensível ao outro gás (gás inerte).

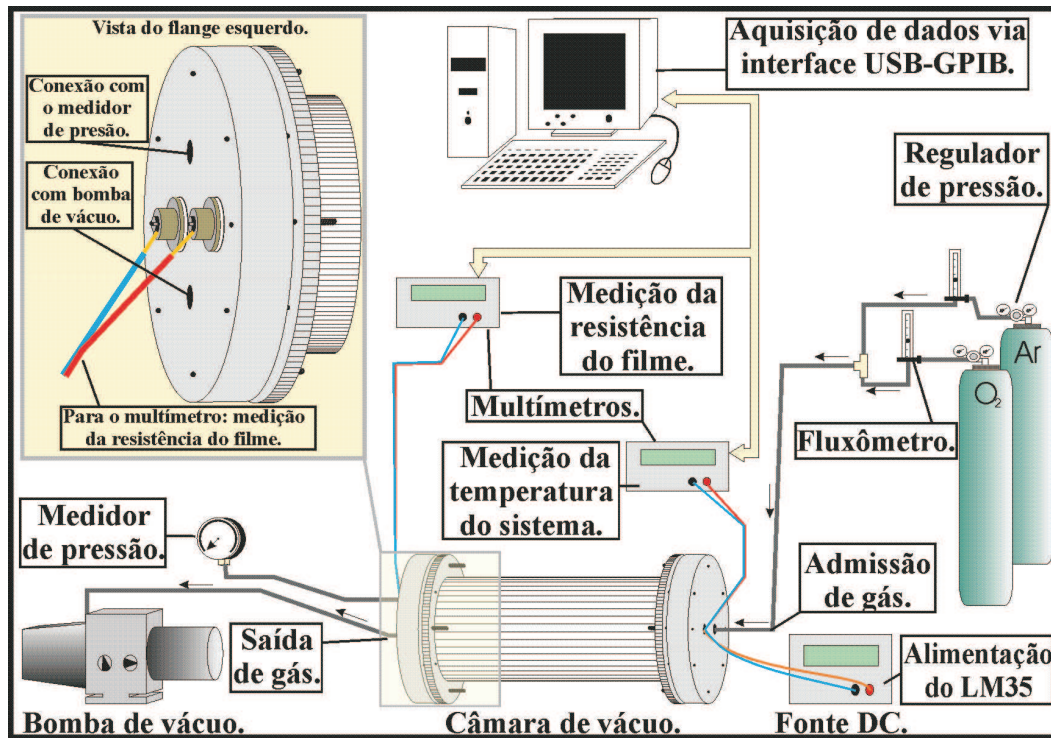


Figura 1.6: Esquema simplificado da plataforma RG.

Nos experimentos, o gás em estudo utilizado foi o oxigênio. Conforme a seção 1.1.1, na superfície dos filmes de SnO_2 ocorre a redução do O_2 , e conseqüentemente uma região de depleção é criada correspondendo à resposta do filme com o aumento de sua resistência elétrica. Os gases inertes utilizados em nossos experimentos foram o hélio e o argônio.

Uma câmara de vácuo foi construída. Ela é composta de dois flanges de alumínio e um tubo de vidro boro-silicato, onde é colocado o filme de SnO_2 em um suporte com 4

pontas em molas que fazem o contato elétrico e servem para medir a resistência do filme. Este suporte é sustentado por duas hastes metálicas presas a um dos flanges que levam o contato elétrico para fora da câmara. Os gases são injetados na câmara de vácuo por um dos flanges e sugados pelo flange oposto por uma bomba de vácuo. Dessa forma, os gases circulam ao longo de todo o tubo da câmara, garantindo a passagem pelo filme e a troca de ar quando há mudança de fluxo. A câmara apresenta boa estanqueidade e atinge vácuo da ordem de $7\text{E-}4$ mbar.

Na Figura 1.7 são mostrados alguns detalhes do projeto da câmara que foram usados para especificar as dimensões das peças, tais como o seu comprimento de 35 cm e diâmetro externo 10 cm. Pode ser visto na Figura 1.7(a) a câmara de vácuo ampliada em 1.7(b) as peças que compõem um dos flanges. A disposição interna da haste bem como do suporte para o filme podem ser vistos em 1.7(c). O sensor de temperatura *LM35* não é visto, pois faz parte do outro flange. Na figura 1.7(d) é mostrado uma ampliação do suporte para o filme que faz contato elétrico através de pontas retráteis montadas sobre molas, assim garantindo o contato elétrico sem danificar a superfície do filme.

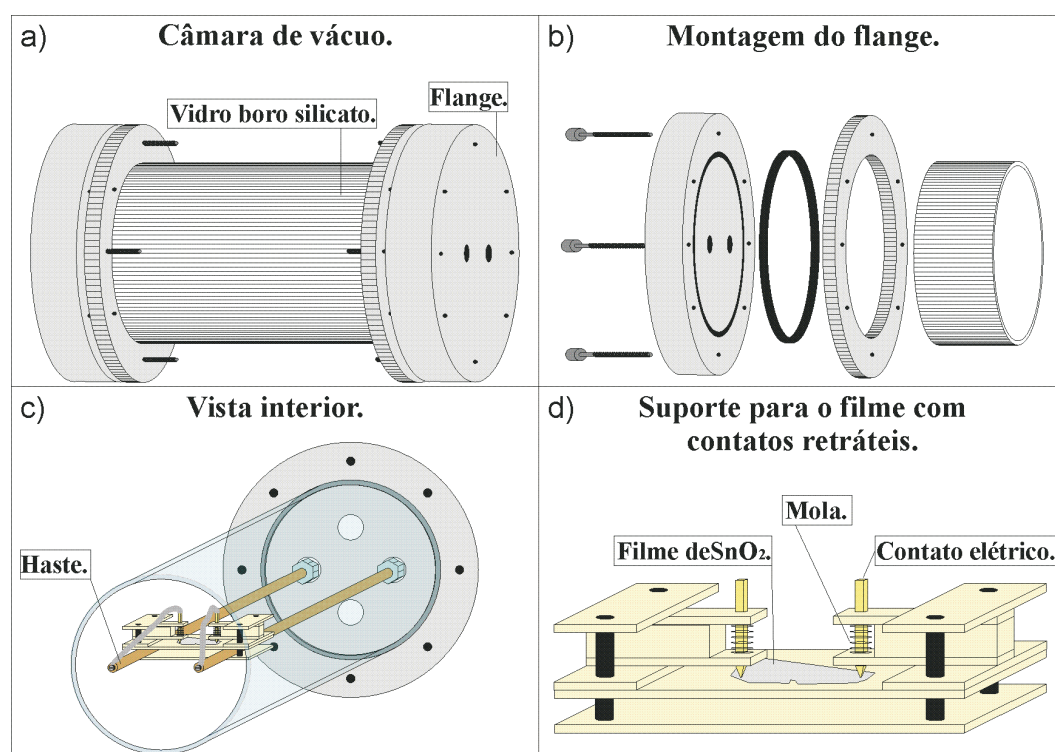


Figura 1.7: Detalhes da câmara de vácuo da plataforma RG.

Para utilização da plataforma RG há uma série de procedimentos e cuidados, pois a câmara e a bomba de vácuo são equipamentos bastante sensíveis. Para todos os experi-

mentos realizados com diferentes filmes, a câmara de vácuo deve ser aberta (retira-se um dos flanges), e novamente fechada após a troca do filme sem deixar folgas entre o flange e o vidro que possam comprometer a realização do vácuo. Por outro lado, deve-se evitar apertar demais os parafusos que prendem o flange, pois isto pode trincar o vidro. Também só se deve operar o sistema com a bomba de vácuo ligada, pois o aumento excessivo de pressão pode romper o vidro. Os cuidados com a bomba são os que dizem respeito a sua manutenção (principalmente verificar regularmente o nível de óleo) e a concentração máxima de oxigênio que não deve exceder 22% em volume.

1.3.4 Plataforma RT - Caracterização Resistência *versus* Temperatura

A caracterização da dependência térmica da resistência elétrica dos filmes de SnO_2 foi obtida com o auxílio de uma plataforma construída em laboratório, denominada neste trabalho de plataforma RT. Obteve-se primeiramente o contato elétrico (contato ôhmico) no filme para medir sua resistência. Isto poderia ser feito simplesmente usando solda fria para prender fios de cobre ao filme, entretanto isto danificaria de forma permanente a superfície do filme diminuindo sua área útil. Interessava fazer um contato temporário apenas no momento da medida e após isto teríamos o filme inalterado. A solução foi construir um medidor de quatro pontas, conforme ilustra a Figura 1.8(A).

O sistema de controle de temperatura consta de uma fonte de corrente controlada por tensão (conversor tensão-corrente) que, por sua vez, fornece uma corrente a entrada de um módulo termoeletrico (*TEM*) do tipo Peltier. Este dispositivo age como bomba de calor criando uma diferença de temperatura entre as suas faces que é função da corrente de entrada. Os módulos termoeletricos, ou módulos Peltier, são constituídos de semicondutores tipo *p* e tipo *n* conectados eletricamente em série por metalização entre duas placas cerâmicas isolantes elétricas e condutoras térmicas (Figura 1.8(B)). O *TEM* foi montado sobre um dissipador de calor (1.8(C)) com sua face controlada sendo a superior (sobre a qual é colocada a amostra). O medidor de quatro pontas é acoplado sobre a amostra e faz-se o isolamento térmico da face superior do módulo Peltier.

1.3.5 Plataforma RL - Caracterização Resistência *versus* Luz

Duas outras plataformas foram criadas para a caracterização da Resistência do Filme de SnO_2 com a intensidade luminosa: uma para baixa intensidade de luz e outra para alta intensidade de luz denominadas de plataforma RL.

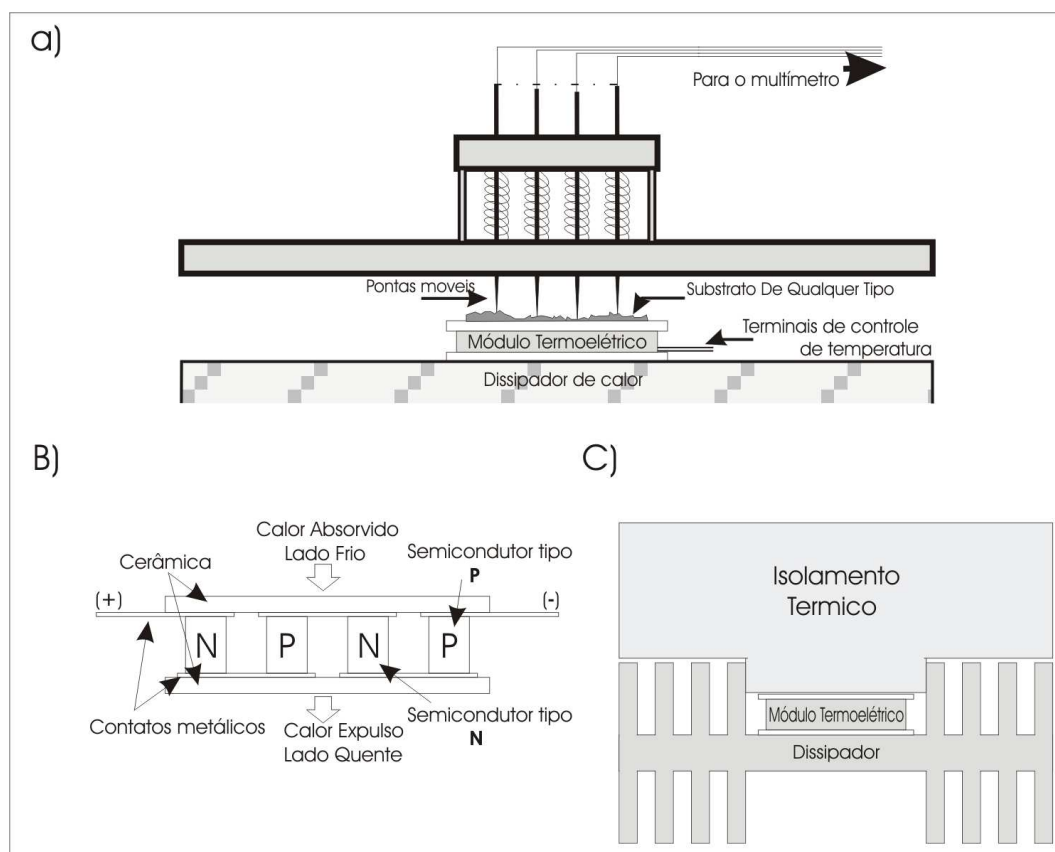


Figura 1.8: Detalhes da plataforma RT: (A) Medidor de quatro pontas, (B) modulo termo elétrico (TEM), (C) TEM montado sobre o dissipador.

A plataforma para caracterização com baixa intensidade de luz consiste de um LED de cor vermelha posicionado sobre o filme a uma distância de aproximadamente 10 mm. O LED foi escolhido como fonte de luz para este experimento devido à facilidade de polarização com baixa corrente e à velocidade de resposta à excitação. Isto permite realizar a caracterização dinâmica da resposta do SnO_2 . Um gerador de funções polariza o LED com forma de onda (quadrada ou senoidal) e amplitude ajustáveis (Figura 1.9). O filme é montado sobre o TEM para controle da temperatura durante os ensaios.

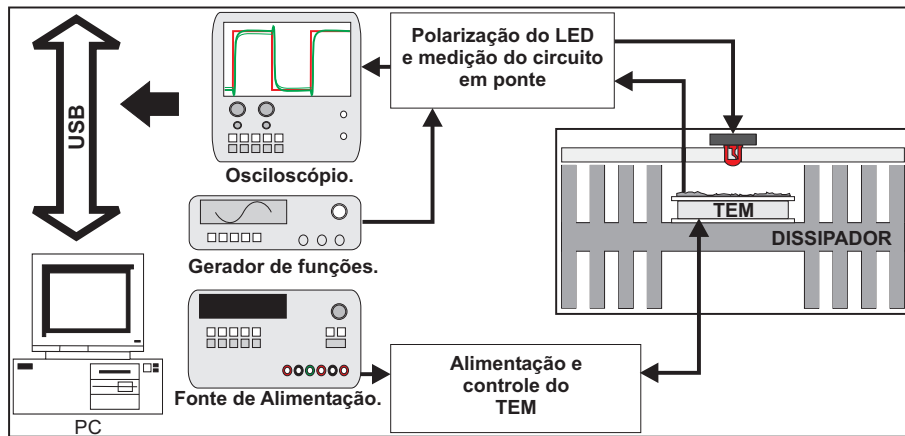


Figura 1.9: Plataforma de caracterização dinâmica do filme de SnO_2

Na plataforma RL para alta intensidade de luz, o filme montado sobre o módulo termoeletrônico é colocado em uma câmara escura com uma lâmpada $DC\ 12V/21W$ sobre o mesmo a uma altura de 50 cm para evitar que o calor da lâmpada perturbe a resistência do filme. A alimentação da lâmpada é controlada com uma fonte de tensão ajustável enquanto um luxímetro Minipa modelo $MLM1010$ posicionado ao lado do TEM fornece a leitura da intensidade luminosa (Figura 1.10).

1.4 Sinopse dos capítulos

O desenvolvimento desta dissertação está dividido em 5 capítulos, cujos principais tópicos serão apresentados de forma resumida:

Neste capítulo inicial apresentou-se considerações preliminares importantes que são utilizadas no desenvolvimento da dissertação, delimita os objetivos deste trabalho, introduz a técnica de deposição de filmes de SnO_2 utilizada no trabalho e apresenta, sucintamente, as técnicas de caracterização das propriedades físico-químicas.

No capítulo 2 apresenta-se o estudo da otimização dos parâmetros da deposição de filmes de óxido de estanho nanoestruturado para a caracterização com oxigênio.

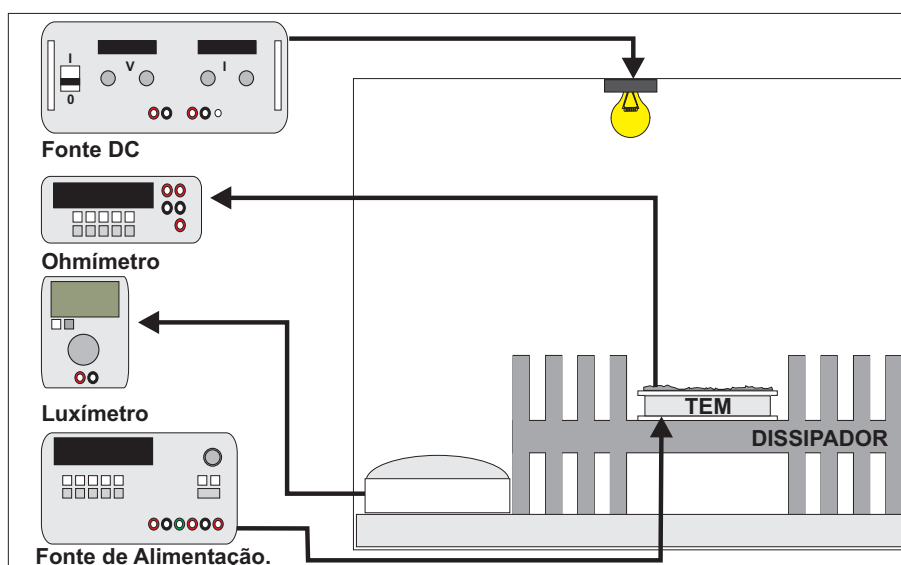


Figura 1.10: Plataforma de caracterização RL

No capítulo 3 descreve-se as caracterizações da fotossensibilidade e térmica da resistência elétrica de filmes de dióxido de estanho poroso nanoestruturado utilizando o processo de pulverização química.

No capítulo 4 apresenta-se o desenvolvimento de um protótipo de um fotodetector utilizando o filme de SnO_2 .

No capítulo 5 apresenta-se as discussões finais e resume-se as principais conclusões e contribuições obtidas a partir dos resultados alcançados. Neste capítulo são sugeridas algumas investigações futuras que dariam prosseguimento às investigações dos filmes de SnO_2 na área de concepção de novos sensores.

Capítulo 2

Estudo da otimização dos parâmetros do processo de *spray*

Este Capítulo apresenta o estudo da otimização dos parâmetros do processo de *spray*. Um conjunto de filmes de SnO_2 foi obtido pelo método de pulverização química (*spray*) permitindo a obtenção de filmes porosos, mais sensíveis que os filmes lisos por terem uma maior área superficial efetiva. As caracterizações dos filmes em função dos parâmetros do processo foram usadas tanto para melhorar o processo de obtenção de filmes como para agregar informações sobre o envelhecimento do filme de SnO_2 em um ambiente oxidante.

2.1 Introdução

Na seção 1.1.1 foi discutido que os filmes de SnO_2 podem ser sintetizados por diversas técnicas. A vantagem de apresentar fácil adesão a muitos substratos (vidro, metal, óxidos, etc.), exibindo uma excelente estabilidade mecânica e química além de, normalmente, não ser contaminado por ácidos e bases a temperatura ambiente [14], este material torna-se bastante favorável para desenvolvimento de sensores comerciais. Dentre as diversas aplicações para os filmes de SnO_2 encontradas na literatura, a sua utilização em detecção de gases é a mais explorada. Fatores atmosféricos, tais como temperatura, umidade [23] e luz [24] também afetam a sua condutividade e são de grande relevância para o condicionamento do filme.

As propriedades ópticas dos filmes de SnO_2 transparentes condutores dependem, fortemente, dos parâmetros de deposição, da microestrutura, dos níveis de impureza e da técnica de crescimento. Zuo et al. [25], estudaram o espectro de micro-Raman dos filmes de SnO_2 com estruturas nanométricas. A análise foi dividida em dois grupos. O primeiro grupo

consistiu na caracterização de filmes de SnO_2 monocristalino ou policristalino com picos de micro-Raman localizados em 472 cm^{-1} , 632 cm^{-1} e 773 cm^{-1} . O segundo grupo caracterizou filmes de SnO_2 como estruturas nanométricas com picos localizados em 358 cm^{-1} e 572 cm^{-1} . Huang et al. [1], observaram os picos de deslocamento Raman dos filmes de SnO , SnO_2 , $Sn(OH)_2$ e $Sn(OH)_4$, conforme mostrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Localização dos picos de micro-Raman dos compostos de estanho [1].

Composto	Deslocamento Raman (cm^{-1})
SnO	470 e 760
$Sn(OH)_2$	470, 752 e 904
SnO_2	470, 636 e 776
$Sn(OH)_4$	580 e 750

Neste capítulo, a sensibilidade da condutividade elétrica do filme de SnO_2 em atmosfera oxidante será investigada para amostras sintetizadas com diferentes parâmetros do processo de pulverização química. Este estudo permitirá verificar o conjunto de parâmetros que otimizam a sua síntese.

2.2 Procedimento experimental

As caracterizações dos filmes em função dos parâmetros do processo, a saber: temperatura, concentração da solução de $SnCl_4 \cdot 5H_2O$ diluída em álcool etílico e fluxo do gás de arraste foram usadas tanto para melhorar o processo de obtenção de filmes como para agregar informações sobre a deteriorização do filme em um ambiente oxidante.

A plataforma RG (ver seção 1.3.3) foi utilizada para a caracterização da resposta da resistência dos filmes com a concentração gasosa. Um conjunto de filmes com diferentes parâmetros foram caracterizados. Estas caracterizações forneceram resultados muito interessantes, tais como o valor dos parâmetros de deposição que otimizam a sensibilidade desses filmes. A resistência elétrica dos filmes e a temperatura do interior da câmara são registradas (usando multímetros Agilent com interface USB-GPIB) à medida que se faz variar o fluxo de O_2 , e estas informações são armazenadas em um arquivo. Nos experimentos realizados, enquanto se mantinha o fluxo do gás inerte constante, fez-se variar o fluxo de O_2 manualmente por meio de uma válvula on-off de forma descontínua gerando uma excitação em onda quadrada. A cada período da caracterização mede-se a resposta

da resistência do filme ao degrau de concentração de O_2 .

Os parâmetros de deposição do processo de pulverização química foram avaliados a partir da sensibilidade dos filmes à detecção de O_2 . Dessa forma, foram estudados 3 grupos de parâmetros do processo (temperatura de deposição, concentração da solução e fluxo do gás de arraste). As Tabelas 2.2, 2.3 e 2.4 apresentam os 3 grupos de parâmetros estudados. É importante ressaltar que em cada grupo apenas um parâmetro foi modificado durante todo o experimento;

Tabela 2.2: Grupo 1 - Temperatura variável.

Parâmetros	Valor
Temperatura	Variável
Concentração da solução depositada	0,007g/ml (14g de $SnCl_4 \cdot 5H_2O$ em álcool etílico)
Fluxo do gás de arraste	7L/min

Tabela 2.3: Grupo 2 - Concentração da solução depositada variável.

Parâmetros	Valor
Temperatura	300 °C
Concentração da solução depositada	Variável
Fluxo do gás de arraste	7L/min

Tabela 2.4: Grupo 3 - Fluxo do gás de arraste variável.

Parâmetros	Valor
Temperatura	300 °C
Concentração da solução depositada	0,007g/ml (14g de $SnCl_4 \cdot 5H_2O$ em álcool etílico)
Fluxo do gás de arraste	Variável

Um grupo de amostras foi avaliado com espectroscopia Raman realizado em temperatura ambiente empregando um espectrômetro RENISHAW - inVia Raman Microscope, com laser de argônio de potência 5 mW e comprimento de onda de 514,5 nm.

2.3 Resultados e discussão

A Figura 2.1 ilustra uma curva típica obtida utilizando a plataforma RG. Essa curva é obtida fazendo o fluxo de gás na câmara de vácuo variar na forma de uma função retangular de período de 1200 segundos.

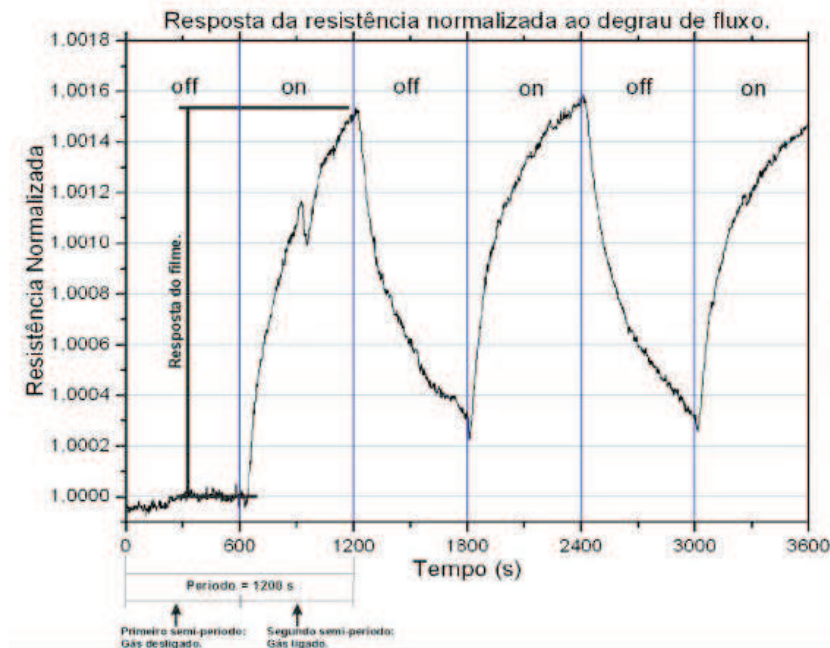


Figura 2.1: Curva típica da fotossensibilidade da resistência elétrica do filme de SnO_2 .

Um tempo para a acomodação do sistema (primeiros 600 segundos) é pré-definido para o início das variações de oxigênio na câmara. Para o tempo entre 600 e 1200 segundos o fluxo de oxigênio está em nível alto (região em "on"), ou seja, há presença do gás no interior da câmara gerando como resposta um aumento da resistência do filme.

Para avaliar como a sensibilidade dos filmes varia com a temperatura de deposição realizou-se experimentos na plataforma RG com filmes depositados com os parâmetros concentração de solução e fluxo do gás de arraste fixo e a diferentes temperaturas de deposição, ver Tabela 2.2. A Figura 2.2 ilustra o resultado da caracterização dos filmes de SnO_2 variando a temperatura de deposição na plataforma RG. A Figura 2.2(A) ilustra a caracterização de vários filmes com diferentes temperaturas de deposição. A Figura 2.2(B) que expressa a máxima sensibilidade de cada filme de SnO_2 variando com a temperatura de deposição.

É observado que a sensibilidade é máxima em torno da temperatura de 350°C . Para determinação precisa do ponto ótimo de deposição para este parâmetro são necessários mais testes principalmente em torno do ponto de máximo encontrado.

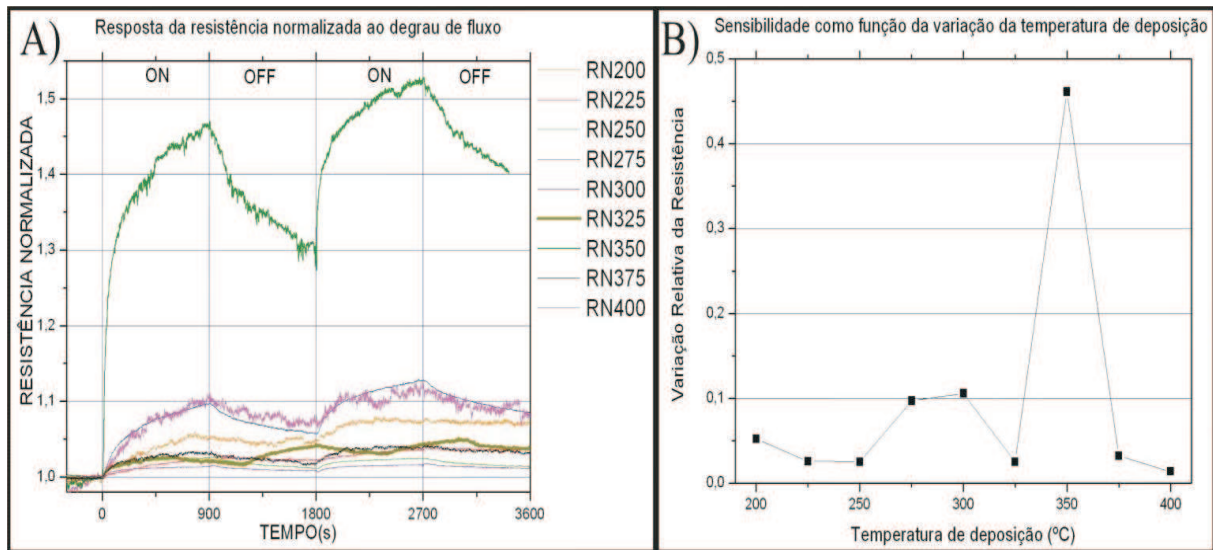
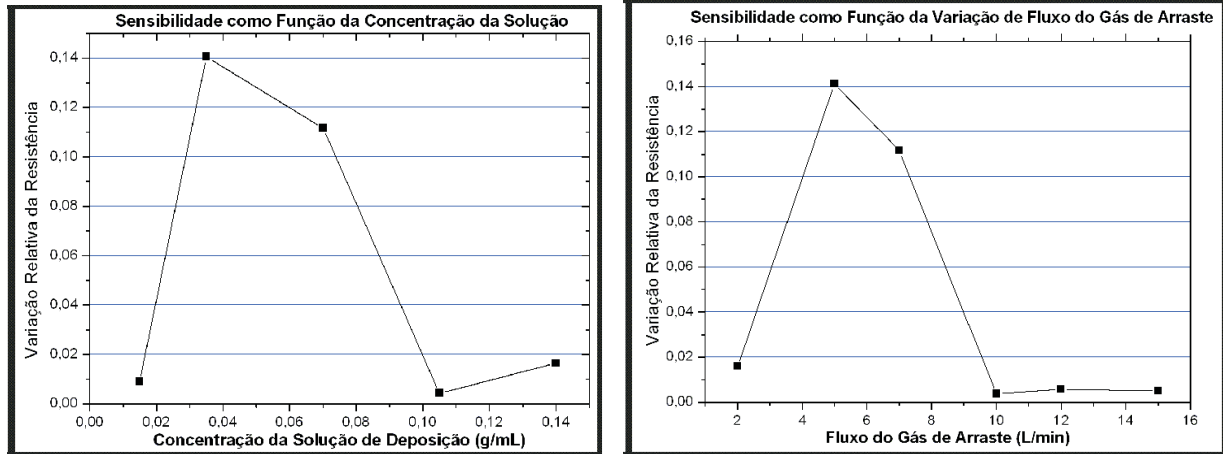


Figura 2.2: Variação da sensibilidade da resistência do filme de SnO_2 com a temperatura de deposição.

Dois outros grupos foram gerados, a saber: (i) temperatura de deposição e fluxo do gás de arraste constantes e variando apenas a concentração da solução depositada, ver Figura 2.3; e (ii) diferentes fluxos do gás de arraste mantendo a temperatura de deposição e a concentração da solução constantes, ver Tabela 2.4. As Figuras 2.3(a) e 2.3(b) ilustram respectivamente a dependência da sensibilidade do filme com a concentração da solução depositada e com o fluxo do gás de arraste.

Quando a temperatura e o fluxo do gás de arraste foram mantidos constantes e a concentração da solução depositada foi variada ($0,02\text{g/ml} - 0,14\text{g/ml}$), ver Figura 2.3(a), a máxima sensibilidade da resistência ocorre em $0,035\text{g/ml}$. Finalmente, a resistência do filme de SnO_2 foi avaliada para diferentes fluxos do gás de arraste ($2\text{L/min} - 15\text{L/min}$) mantendo a temperatura de deposição e a concentração da solução constantes, ver Figura 2.3(b). A máxima sensibilidade da resistência ocorre em 5L/min .

Com relação ao comportamento dinâmico, vale observar que o período de 15 minutos de exposição do filme ao fluxo de oxigênio na câmara (Figura 2.2) não foi suficiente para que a sua resposta atingisse o valor em regime. Entretanto, nota-se que a sua resistência apresenta alta taxa de variação nos primeiros segundos quando a válvula do oxigênio é aberta. Isto permite detectar a presença de oxigênio. Por outro lado, a plataforma RG não permite determinar a concentração do O_2 na câmara devido ao controle impreciso do fluxo dos gases, consequentemente não é possível obter um modelo conforme descrito pela equação 1.3.



(a) Dependência com a concentração da solução depositada.

(b) Dependência com o fluxo do gás de arraste.

Figura 2.3: Sensibilidade de filmes de SnO_2 poroso.

A Figura 2.4 ilustra os espectros de micro-Raman típicos do silício (curva (a), utilizado como substrato) e das amostras SnO_2 depositadas através do processo de pulverização química (curvas (b), (c) e (d)) para um grupo específico de parâmetros de deposição (temperatura de deposição: 350°C , fluxo do gás de arraste: 7 L/min e concentração da solução de SnCl_4 : $0,035\text{ g/mL}$).

A Figura 2.4 (curva (a)) mostra que a alta intensidade do pico de deslocamento Raman do silício, em torno de 519 cm^{-1} , não ofusca os picos que identificam o SnO_2 e os sub-compostos gerados no processo de deposição. Na Figura 2.4 (curvas (b), (c) e (d)), verifica-se um elevado número de picos de deslocamento Raman. Os picos de deslocamento Raman localizados em 358 cm^{-1} e 572 cm^{-1} são de SnO_2 com estrutura nanométrica [25] e os picos localizados em 470 cm^{-1} , 636 cm^{-1} e 776 cm^{-1} são de SnO_2 monocristalino ou policristalino [1]. Os outros picos provavelmente são explicados pela interação estanho/silício ou estanho/óxido de silício, pois não são associados a nenhum subproduto dos óxidos de estanho.

A Figura 2.5 mostra uma imagem tridimensional típica de MFA da superfície do filme de SnO_2 sobre substrato de silício. Para altas temperaturas, o tamanho dos grãos dos filmes de SnO_2 é em torno de 90 a 120 nm .

Um outro resultado interessante do filme de SnO_2 foi o estudo da perda de sensibilidade dos filmes com o tempo de exposição ao oxigênio. A Figura 2.6 ilustra curvas típicas da evolução da resistência elétrica do filme sob atmosfera de oxigênio.

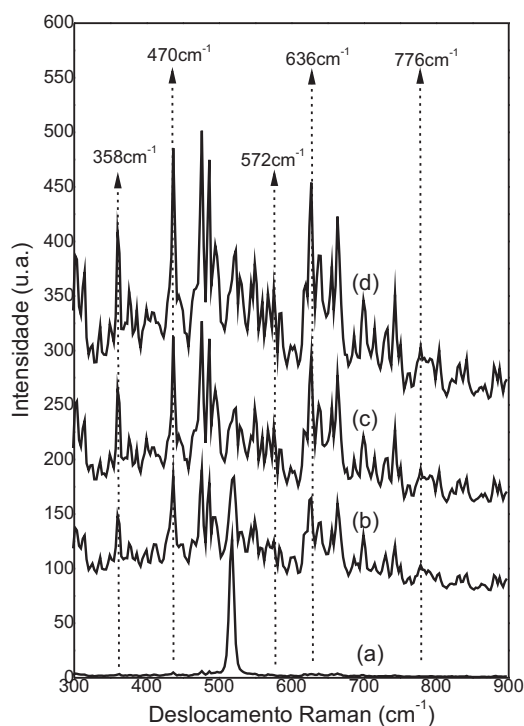


Figura 2.4: Espectro Raman típico das amostras de SnO_2 depositados pelo processo de pulverização química.

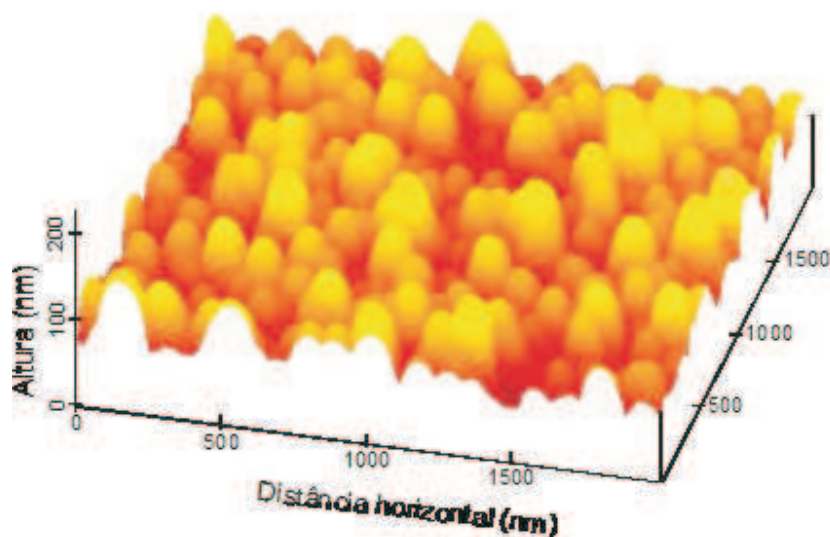


Figura 2.5: Imagem tridimensional típica de MFA da amostra de SnO_2 depositada sobre substrato de silício.

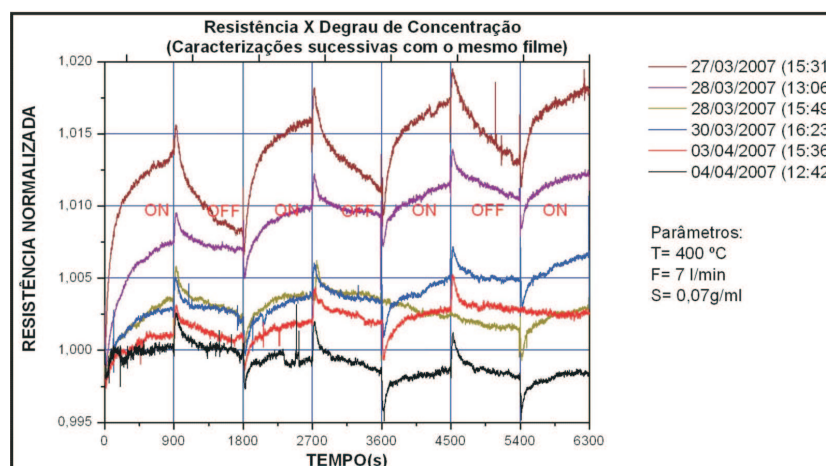


Figura 2.6: Perda de sensibilidade de filmes de SnO_2 com a exposição ao oxigênio.

É observado que os filmes de SnO_2 perdem sua sensibilidade à medida que são expostos ao oxigênio. Isto é claramente observado na Figura 2.6 que apresenta várias caracterizações sucessivas com o mesmo filme.

2.4 Conclusões

A obtenção de filmes que tenham uma maior sensibilidade torna possível também a obtenção de sensores com melhor desempenho. Como foi mostrado com os dados das caracterizações é possível escolher o valor dos parâmetros de deposição que maximizam a sensibilidade do filme de SnO_2 .

Os filmes de SnO_2 são muito utilizados na construção de diferentes sensores. Foi demonstrado que o substrato de silício é totalmente coberto pelo filme de SnO_2 com tamanho de poros nanométricos. Neste caso, é evidente um aumento da área útil de detecção dos filmes de SnO_2 quando comparado com os filmes planos depositados sobre o mesmo substrato. Dessa forma, demonstrou-se que é possível obter um sensor, possivelmente mais sensível, com filmes de SnO_2 poroso utilizando a técnica de pulverização química.

Capítulo 3

Caracterização e modelagem do filme de SnO_2

Este capítulo apresenta a modelagem da propriedade térmica e a propriedade da foto-sensibilidade dos filmes de dióxido de estanho poroso nanoestruturado.

O filme de SnO_2 será tratado como um sensor resistivo semicondutor e suas características serão avaliadas tomando como referência o comportamento típico de termistores e LDRs (*Light Dependent Resistor*) devido ao vasto conhecimento disponível na literatura e aplicações de domínio da engenharia. Os resultados obtidos serão a base para o desenvolvimento de um sistema de medição eletrônico que será abordado no Capítulo 4.

3.1 Introdução

Os materiais elétricos, especialmente os condutores e semicondutores, são sensíveis à temperatura. Para os condutores, o aumento desta grandeza provoca o aumento da energia de vibração dos átomos em torno da sua posição de equilíbrio contribuindo para a diminuição da condutividade do material. Sensores do tipo RTD (*Resistance Temperature Detector*) são fundamentados neste princípio. Para os materiais semicondutores, a energia térmica é capaz de alterar significativamente a sua condutividade devido a transição de portadores de carga da banda de valência para a de condução. Este efeito depende da quantidade de impurezas do material, que quando dopados excessivamente passam a apresentar propriedades metálicas em uma determinada faixa de temperatura. Dispositivos com estas características são chamados de termistores comumente conhecidos por NTC (*Negative Temperature Coefficient*) quando apresentam coeficiente negativo de resistência ou PTC (*Positive Temperature Coefficient*) quando sua resistência aumenta com a temperatura.

Além da radiação térmica, alguns dispositivos semicondutores também apresentam alteração da sua banda de condução com a incidência de radiação eletromagnética. O fenômeno é conhecido desde 1873 quando Willoughby Smith observou o efeito da fotocondutividade no Selênio [23]. Os LDRs apresentam alta resistividade na ausência de luz (na faixa de $\text{M}\Omega$) e baixa resistividade quando expostos a ela. Os LDRs podem ser fabricados com diversos materiais e diferenciam-se basicamente quanto à resposta espectral, ao tempo de resposta e à sensibilidade. Os compostos de cádmio, tais como CdS , CdSe e CdTe , apresentam comportamento similar ao da visão humana, e por isso, são bastante usuais na fabricação de LDRs para a faixa do espectro visível e do infravermelho próximo. Dentre suas principais aplicações, destaca-se: controle de iluminação ambiente, controle de iluminação pública, sistemas de posicionamento, detecção de presença em sistemas de segurança, controle do diafragma em câmeras fotográficas, etc. As Figuras 3.1(a) e 3.1(b) ilustram a resposta espectral e a curva característica de um LDR de CdS fabricado pela *Sunrom Technologies* [26].

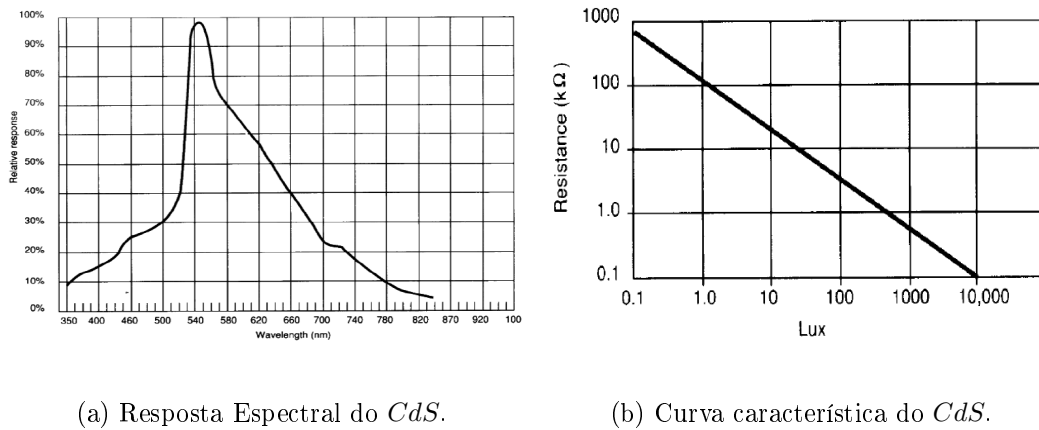


Figura 3.1: Característica típica do CdS .

A Tabela 3.1 sumariza um quadro comparativo de dois modelos de fotocélula de CdS da *Dick Smith Electronics* (mod. Z-4801) [27] e da *Sumron Technologies* (mod. 3190). Os parâmetros T_r e T_f correspondem respectivamente aos tempos de subida e decaimento.

Apesar da vasta aplicabilidade deste material, alguns fabricantes como a *Hamamatsu Photonics* [28] descontinuaram a sua produção em consonância com as restrições impostas pela diretiva ROHS de importação do cádmio pela Comunidade Européia. A *Vishay Semiconductors* apresenta uma alternativa substituição do CdS em circuitos medição e controle de iluminação ambiente (fotorelé) por fototransistores [29], mantendo a simplicidade do circuito original.

Tabela 3.1: Parâmetros característicos de LDRs de CdS

Modelo	T_r (ms)	T_f (ms)	R @ 10 lux	R @ 0 Lux	Pico da Resp. Espectral
Z-4801	40	50	50 a 140 k Ω	10 M Ω	620 nm
3190	18	120	9 k Ω	1 M Ω	550 nm

Os compostos de chumbo PbS , PbSe e PbTe , InSb e HgCdTe (também chamados de MCT - *Mercury Cadmium Telluride*) apresentam boa fotocondutividade na região do infravermelho, entretanto são bastante sensíveis à temperatura e requerem compensação desta variável pelo circuito de medição. São utilizados como detetores em análise de umidade e gases em espectrofotometria de infravermelho. As Figuras 3.2(a), 3.2(b) e 3.2(c) ilustram a resposta espectral típica do PbS e PbSe e MCT respectivamente [30].

Outro tipo de fotodetector muito utilizado em aplicações que demandam tempo de resposta rápido na faixa do infravermelho próximo (da ordem de ps) com ampla faixa espectral são os fotodiodos sintetizados com compostos de Índio (InSb , InGaAs , InAs). Destacam-se principalmente em sistemas comunicações óticas, sistemas de medição de laser [31], termografia de altas temperaturas, espectroscopia, tomografia [32], etc.

A simbologia técnica padronizada pela IEC para representação de termistores e LDRs em esquemas de circuitos eletrônicos é apresentada nas Figuras 3.3(a) e 3.3(b) respectivamente. O símbolo adotado para representação do filme de SnO_2 neste trabalho é ilustrado na Figura 3.3(c).

O filme de SnO_2 será caracterizado termicamente com um sistema de aquecimento montado em laboratório e modelado tomando por base a curva de um termistor (modelo RT). A caracterização da fotossensibilidade do filme será limitada à faixa do espectro visível obtendo-se uma curva característica Resistência versus Intensidade Luminosa (modelo RL) para diferentes temperaturas. O parâmetro da fotossensibilidade será apresentado e investigado por vários dias com ensaios sob vácuo e pressão atmosférica. Por fim, os principais parâmetros dinâmicos do filme serão extraídos aplicando-se entradas em degrau e senoidal para diferentes temperaturas a fim de investigar os limites de aplicação do material.

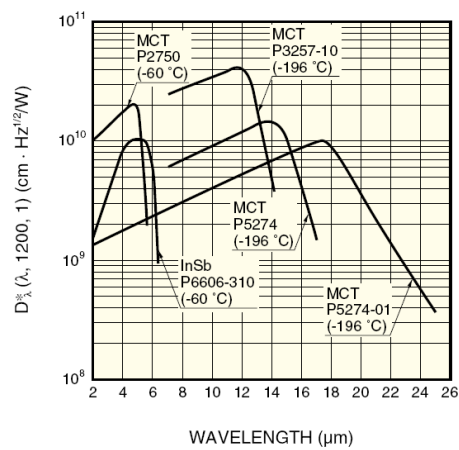
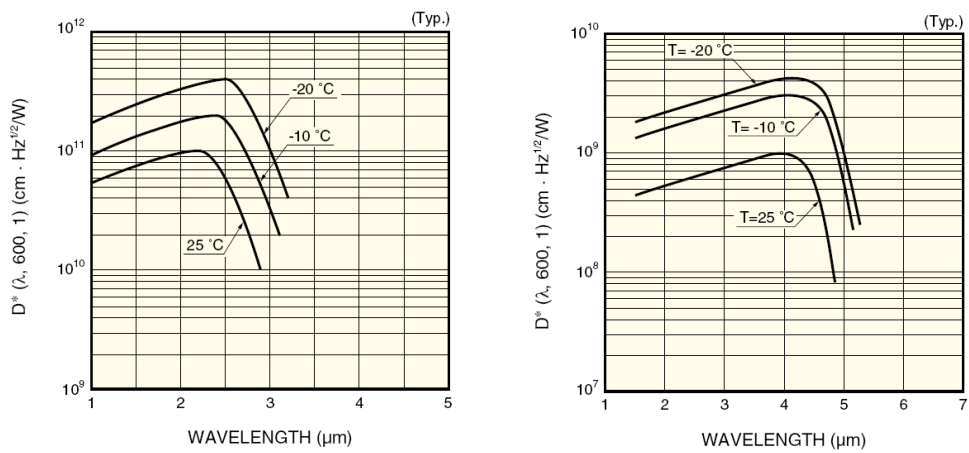


Figura 3.2: Caracterização espectral típica do PbS , PbSe e MCT .

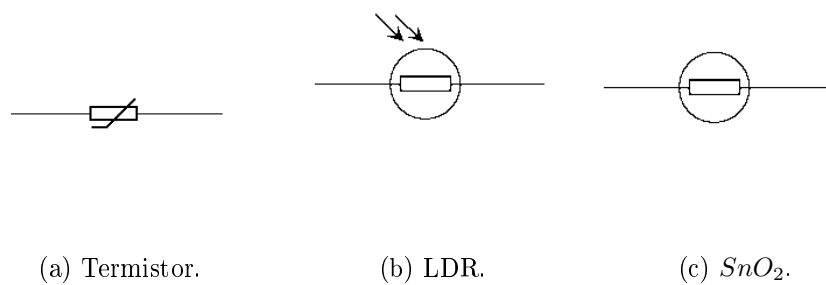


Figura 3.3: Simbologia utilizada para representação em circuitos eletrônicos.

3.2 Procedimento experimental

A caracterização estática RT é realizada com o auxílio da plataforma RT descrita na seção 1.3.4. A temperatura é variada entre 20 e 134 °C por alguns ciclos. A entrada do conversor tensão-corrente (Figura 3.4) provém de uma fonte digital Agilent modelo *E3631A* que por sua vez recebe comando digital de um programa no terminal computacional que realiza a ação de controle. A temperatura do filme (T_m) é medida através do transdutor integrado *LM35* que transforma a informação de temperatura em tensão. Faz-se o *LM35* entrar em contato térmico com o filme e seus terminais de saída são ligados a um multímetro digital Agilent modelo 34401A que envia estas informações ao programa. Paralelamente, outro multímetro mede a resistência do filme também enviando dados ao programa.

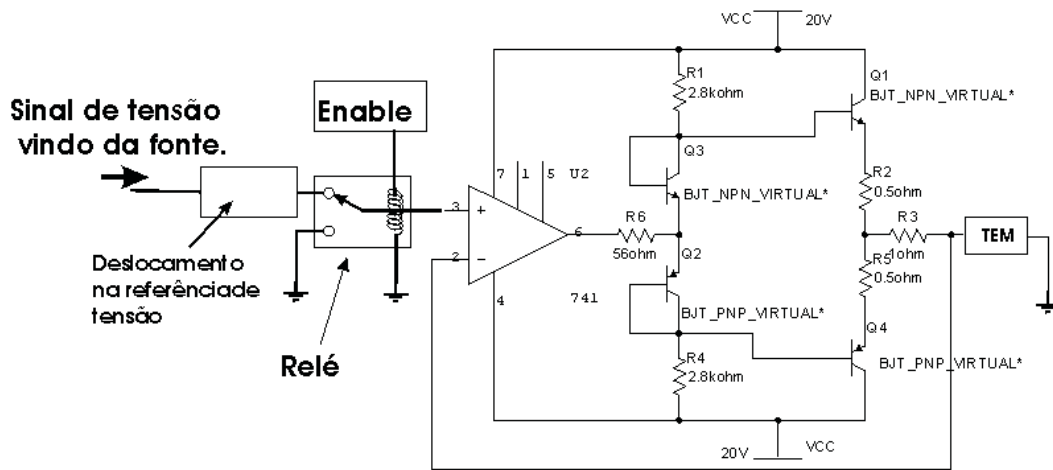


Figura 3.4: Esquema simplificado do conversor tensão-corrente.

Uma estratégia de controle PID (Proporcional Integral Diferencial) foi implementada por um programa desenvolvido em linguagem *C++*. Todas as aquisições dos sinais de interesse e a ação de controle do peltier são realizadas a cada 1s. O programa de controle da temperatura gera um sinal de referência triangular vista na Figura 3.5.

É visivelmente observado que a temperatura de referência e a temperatura medida são coincidentes. O desempenho do controlador é comprometido nas mudanças de derivada da temperatura de referência. Um ajuste mais apurado e preciso deve possibilitar um melhor rastreamento da temperatura de referência e minimizar o erro. No entanto, para a caracterização do filme de SnO_2 o controle utilizado é suficiente para a realização do experimento com sucesso.

A característica estática RL foi obtida mantendo-se a temperatura do sensor constante enquanto o filme é excitado com luz visível de intensidade variável. A plataforma de

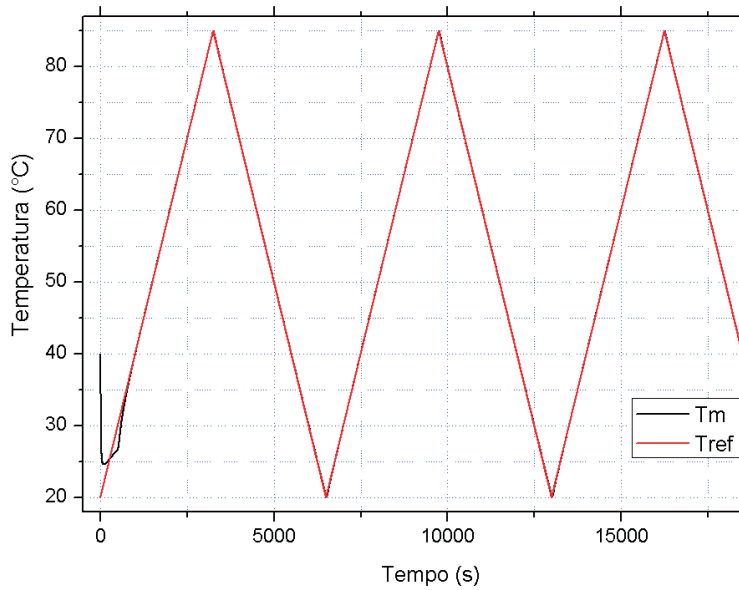


Figura 3.5: Temperatura de referência (vermelho), temperatura medida (preto).

caracterização RL da Figura 1.10 foi utilizada para excitar o filme na faixa de 0 a 700 *Lux*. A caracterização foi feita para três temperaturas diferentes: 20°C, 30°C e 40°C.

A fotossensibilidade também foi investigada por um período de 55 dias sob vácuo utilizando a plataforma RG ilustrada na Figura 1.7 montada dentro de uma caixa escura sob uma lâmpada fluorescente. A resistência da lâmpada era registrada abrindo ou fechando a caixa. O objetivo deste experimento é verificar o comportamento da fotossensibilidade durante um intervalo de tempo prolongado bem como avaliar a influência de outros fatores físicos como a umidade e gases presentes no ar.

A caracterização morfológica do filme de SnO_2 por MFA será apresentada ao final da discussão.

Para a caracterização dinâmica da fotossensibilidade do filme, utilizou-se a plataforma experimental da Figura 1.9 aplicando-se uma onda quadrada para avaliação da resposta ao degrau entre 0 e 15 *Lux*. A resposta em frequência também foi avaliada com entrada senoidal de baixa amplitude (1 *Lux*) em torno de um ponto de polarização de 13 *Lux* para evitar não linearidades do LED.

Um circuito em ponte foi projetado para converter a resistência do filme em tensão conforme ilustrado na Figura 3.6. A topologia escolhida polariza o sensor com uma corrente constante para minimização do efeito de auto aquecimento (efeito *Joule*). Um filtro RC

passa-baixa é aplicado à saída do circuito que por sua vez é medida com um osciloscópio digital Yokogawa modelo *DL1700E*.

Este sistema de aquisição permite adquirir dados a taxas mais altas que a GPIB, portanto é mais adequado ao experimento proposto. Os dados são armazenados em um PC via interface USB. Os ensaios foram realizados para várias temperaturas entre 25 e 45 °C.

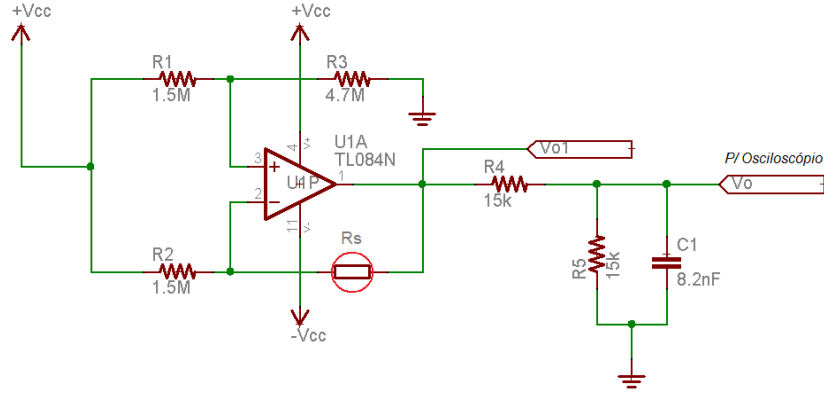


Figura 3.6: Esquema do circuito em ponte conversor R/V.

Sejam $V^{(-)}$ e $V^{(+)}$ as entradas inversora e não inversora do amplificador operacional respectivamente, $V_{cc} = \pm 15V$, R_s a resistência elétrica do filme de SnO_2 , e I_s a sua corrente de polarização. Admitindo-se as características ideais do amplificador operacional, pode-se obter as equações do circuito como segue:

$$V^{(-)} = V^{(+)} = \frac{R_3}{R_1 + R_3} V_{cc} \quad (3.1)$$

$$I_s = \frac{V_{cc} - V^{(-)}}{R_2} = \frac{V^{(-)} - V_{o1}}{R_s} \quad (3.2)$$

Substituindo-se a equação 3.1 em 3.2, tem-se que:

$$V_{o1} = \frac{R_2 \cdot R_3 - R_1 \cdot R_s}{R_2 \cdot (R_1 + R_3)} V_{cc} \quad (3.3)$$

Fazendo-se $R_4 = R_5 = R$, a saída do filtro (V_o) pode ser obtida no domínio da frequência, através da transformada de Laplace conforme segue:

$$\frac{V_{o1}(s) - V_o(s)}{R} = \frac{V_o(s)}{R} + sCV_o(s) \quad (3.4)$$

Ou ainda:

$$V_o(s) = \frac{V_{o1}(s)}{2 + RCs} \quad (3.5)$$

$$V_o(s) = V_{o1}(s)H(s) \quad (3.6)$$

Em que $H(s)$ é a função de transferência do filtro.

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_{o1}(s)} = \frac{1}{2 + RCs} \quad (3.7)$$

Testes preliminares mostraram que o filme apresentava atenuação inferior a 3 dB na faixa de frequência de 0 a 650Hz, entretanto, as caracterizações foram realizadas até a frequência de 2 kHz. Desta maneira, o filtro foi projetado com frequência de corte de 2,59kHz e ganho estático 0,5 para que a faixa de variação de amplitude estivesse dentro dos limites da lógica TTL. Isto facilitará a interface com um sistema microcontrolado conforme abordagem discutida no Capítulo 4.

A frequência de corte ω_c do filtro é dada pelo pólo de $H(s)$, e o ganho estático fazendo-se $s = 0$ conforme as equações 3.8 e 3.11 respectivamente:

$$\omega_c = \frac{2}{RC} = \frac{2}{15 \cdot 10^3 \times 8,2 \cdot 10^{-9}} \quad (3.8)$$

$$\omega_c = 16260 \text{ rad/s} \quad (3.9)$$

$$f_c = 2,59 \text{ kHz} \quad (3.10)$$

$$H(0) = \frac{1}{2} \quad (3.11)$$

A equação que descreve saída do circuito V_o , pode ser obtida substituindo-se os valores das resistências e capacitância na equação 3.6:

$$V_o(s) = (11,37 + 2,42 \cdot 10^{-6} \cdot R_S) \frac{1}{2 + 1,23 \cdot 10^{-4}s} \quad (3.12)$$

3.3 Resultados e discussão

3.3.1 Caracterização e modelagem da propriedade térmica

A Figura 3.7 ilustra a caracterização da propriedade térmica do filme de SnO_2 para 5 ciclos de varredura da plataforma RT entre 20 e 134 °C.

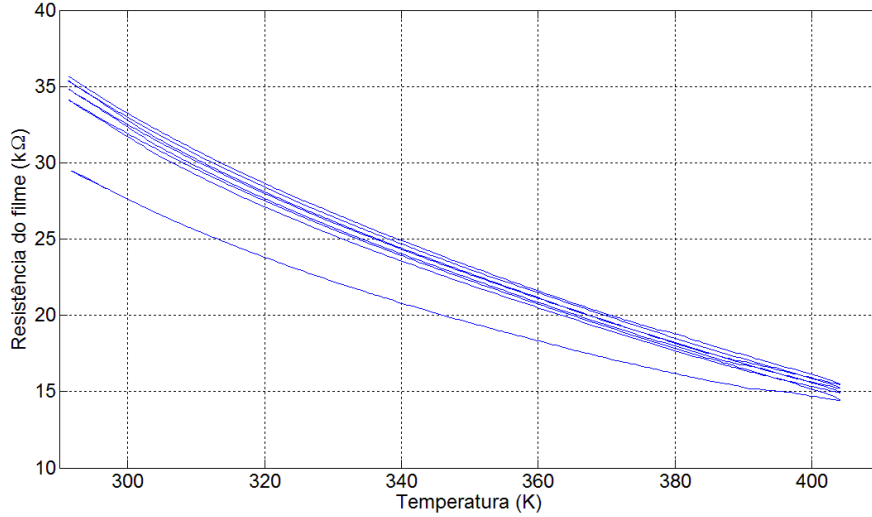


Figura 3.7: Curva típica da resposta do filme de SnO_2 à variação da temperatura.

Verifica-se que o filme de SnO_2 apresenta a curva típica de um termistor do tipo NTC, entretanto um efeito de histerese pode ser observado. Nesta dissertação não estudaremos o fenômeno da histerese. Um modelo foi obtido em MATLAB para uma das curvas da característica RT por meio de uma aproximação por uma função exponencial que descreve o comportamento de um NTC:

$$R = Ae^{\frac{B}{T}} \quad (3.13)$$

onde: R é a resistência do sensor; T é a temperatura em kelvin; e A e B são constantes do material. Os parâmetros obtidos foram $A = 2271$ e $B = 763,1$ com $\sigma^2 = 0.9989$. A Figura 3.8 ilustra a curva de resposta do filme utilizada para obtenção do modelo.

O modelo obtido apresenta um bom ajuste e pode ser utilizado na implementação de um sistema de medição de temperatura com o filme de SnO_2 ou para compensação de temperatura quando o mesmo for aplicado na medição de outra grandeza. De outra maneira, pode-se também linearizar esta curva característica utilizando-se duas técnicas, segundo Blackburn [33]: medindo-se a queda de tensão em uma resistência em série com o

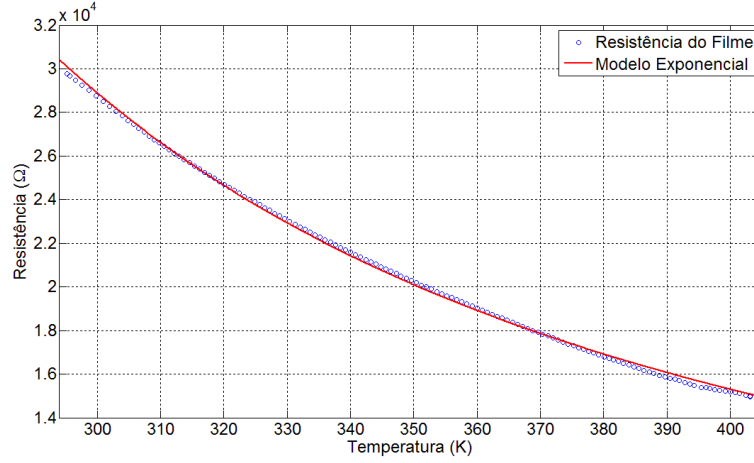


Figura 3.8: Curva típica da resposta do filme à variação da temperatura e curva do modelo obtido.

filme, ou conectando-se um resistor em paralelo (*shunt*) ao mesmo, cuja tensão apresenta-se linear em uma dada faixa de temperatura.

3.3.2 Caracterização e modelagem da propriedade de fotossensibilidade

Figura 3.9 ilustra a resposta típica da resistência elétrica do filme de SnO_2 ao chaveamento de luz visível sobre a superfície do filme. A amostra caracterizada neste experimento é diferente da utilizada na seção anterior. Foi observado que o valor da resistência do filme apresenta dois níveis distintos que são obtidos variando apenas a intensidade de luz visível sobre o mesmo. Na ausência de luz, verifica-se que a resistência medida está em torno de $82,5 \text{ M}\Omega$ e na presença de luz, a resistência medida assume o valor em torno de $45 \text{ M}\Omega$. A transição entre os dois níveis é bastante abrupta possibilitando aplicações de detecção (fotodetectores) de presença e/ou ausência de luz visível no ambiente. Esse fenômeno foi denominado de fotossensibilidade da resistência do filme de SnO_2 .

Define-se a sensibilidade do filme de SnO_2 , S , como a variação relativa da sua resistência elétrica de acordo com a expressão:

$$S = \frac{(R_1 - R_2)}{R_1} \quad (3.14)$$

em que R_1 expressa a resistência média no primeiro nível (resistência do filme sem incidência de luz) e R_2 expressa a resistência média no segundo nível (resistência do filme com incidência de luz).

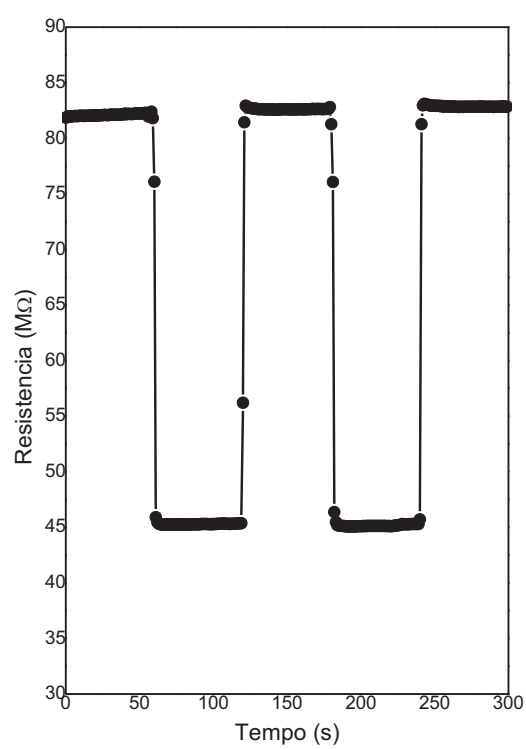
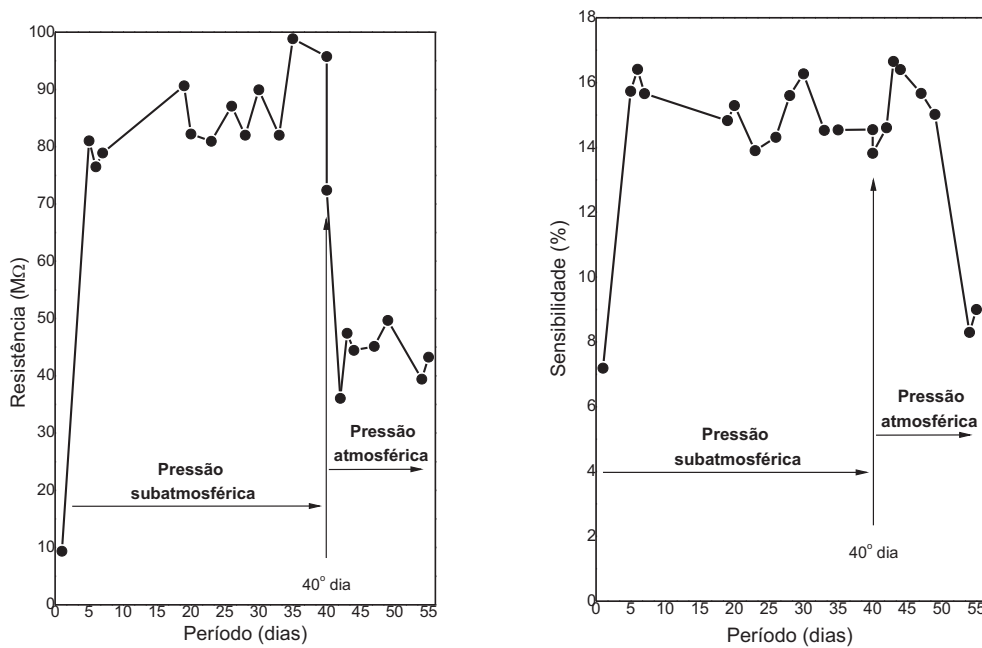


Figura 3.9: Curva típica da resposta do filme de SnO_2 ao chaveamento de luz visível.

No exemplo ilustrado na Figura 3.9, a variação relativa da resistência elétrica do filme de SnO_2 é da ordem de 45% dependendo da intensidade de luz visível incidente na área sensível do filme. No entanto, verificou-se que a resistência elétrica dos filmes de SnO_2 variam tipicamente na faixa de 20 $K\Omega$ a 100 $M\Omega$ para o conjunto de amostras estudado. Esta ampla faixa provavelmente pode ser atribuída à não uniformidade do tamanho e geometria dos substratos de silício utilizados para deposição dos filmes devido à técnica de corte manual.



(a) valor da resistência elétrica (medida sem incidência de luz visível no filme).

(b) sensibilidade (variação relativa) da resistência do filme de SnO_2 .

Figura 3.10: Caracterização da fotossensibilidade em ambiente controlado.

As Figuras 3.10(a) e 3.10(b) ilustram respectivamente o valor da resistência elétrica (medida sem incidência de luz visível) e da sensibilidade do filme de SnO_2 . O experimento teve a duração de 55 dias e foi dividido em duas fases: nos primeiros 40 dias, a resistência do filme foi medida sob pressão subatmosférica de 700 $mmHg$ e na segunda fase por 15 dias em pressão atmosférica. Durante o experimento, a temperatura média da câmara foi mantida constante em torno de 26 $^{\circ}C$. A umidade relativa do ar foi reduzida de 72% para 17% na primeira fase, permanecendo estável após o quinto dia do experimento.

Observou-se que nos primeiros dias do experimento, na primeira fase, a resistência

medida do filme alterou-se abruptamente de $10\text{ M}\Omega$ para valores em torno de $80\text{ M}\Omega$, conforme mostrado na Figura 3.10(a). Essa variação pode ser atribuída à redução da umidade no interior da câmara. Neste mesmo período, a fotossensibilidade também se altera abruptamente de 7% para valores em torno de 16%, conforme a Figura 3.10(b). Na segunda fase, desligou-se a bomba de vácuo e a pressão atmosférica no interior da câmara restabeleceu-se em um intervalo de dois dias. A resistência do filme e a fotossensibilidade reduzem-se para valores em torno de $40\text{ M}\Omega$ e 8%, respectivamente.

Na Figura 3.11 tem-se a curva característica RL do filme de SnO_2 para diferentes temperaturas. Pode-se notar que para a faixa de 0 a 200Lux o filme apresenta maior sensibilidade e que esta propriedade é mais acentuada quanto menor for a temperatura. O aumento da temperatura propicia a geração de portadores de carga aumentando a condutividade do material, o que, por sua vez, limita o efeito provocado pela incidência de luz.

Um modelo foi obtido para a curva de 20°C (Figura 3.11) por meio de uma aproximação de uma função exponencial descrita pela equação 3.15:

$$R(L) = a \cdot e^{b \cdot L} + c \cdot e^{d \cdot L} \quad (3.15)$$

Em que L é a intensidade de luz em Lux e os parâmetros obtidos foram: $a = 39,06$; $b = -0,2014$; $c = 15,59$; $d = 0,001179$; com $\sigma^2 = 0,9755$.

Para $\lambda > 200\text{ Lux}$, nota-se que apesar da fotossensibilidade não ser alta, a curva apresenta boa linearidade possibilitando a utilização de um modelo mais simples para situações em que o filme seja projetado para trabalhar somente nesta região do gráfico.

A Figura 3.13 mostra a morfologia tridimensional da amostra depositada a 350°C , que representa a morfologia típica das amostras reveladas por MFA. O tamanho dos grãos a 350°C é de cerca de 50nm . Todas as amostras apresentam uma morfologia granular com a uniformidade de tamanho das partículas e boa cobertura superficial. O aumento da temperatura de deposição contribui para o aumento da rugosidade do filme e também do aumento lateral do tamanho dos grãos. A altura das partículas é quase igual a seus diâmetros.

3.3.3 Caracterização dinâmica do filme de SnO_2

Alguns parâmetros de desempenho dinâmico do filme foram avaliados tais como tempo de subida, tempo de decaimento e variação da saída para diferentes temperaturas quando submetido a baixa intensidade de luz. O ensaio foi realizado aplicando-se um sinal de onda

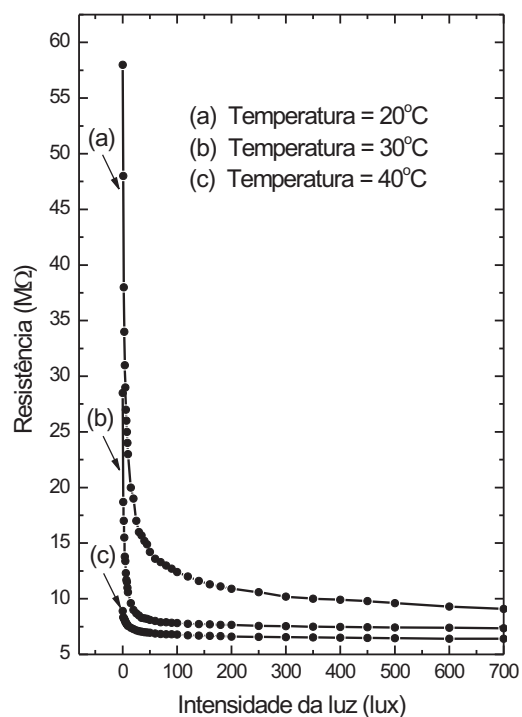


Figura 3.11: Curva característica da resistência elétrica com a intensidade de luz e temperatura.

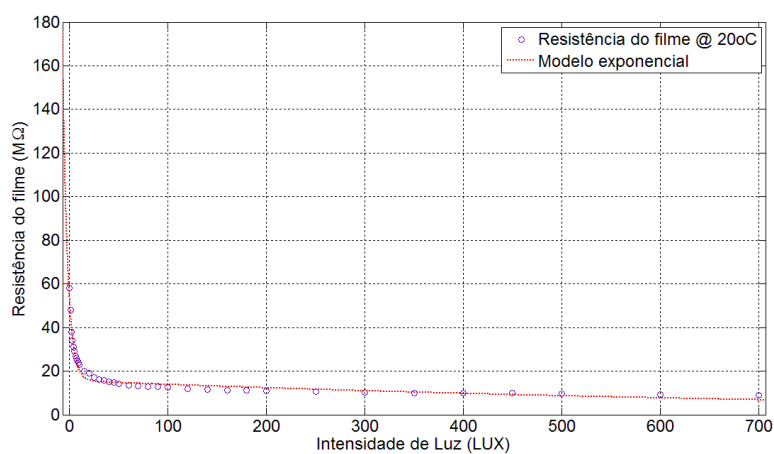


Figura 3.12: Modelo aproximado para a curva característica da resistência elétrica a 20°C .

quadrada à fonte de luz (LED) entre 0 e 15 Lux para temperaturas entre 25°C e 45°C . A resposta do circuito de condicionamento analógico com a temperatura do filme em 25°C e 45°C pode ser visto nas Figuras 3.14(a) e 3.14(b) respectivamente. Pallàs-Areny *et al.* [23]

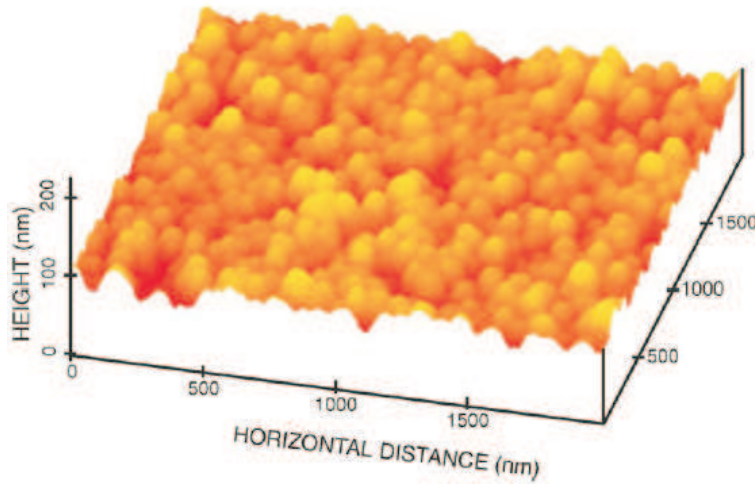


Figura 3.13: Imagem de MFA de uma amostra depositada a 350°C , que representa a morfologia típica das amostras reveladas por MFA.

caracterizam o tempo de resposta dos LDRs com aproximação a sistema de 1ª ordem, isto é, considerando o tempo de subida igual ao tempo necessário para a resposta atingir 63% do seu valor final. Esta consideração também será feita para o filme de SnO_2 .

Do conjunto de resultados obtidos observa-se que o filme de SnO_2 atinge um nível de saturação da sua condutividade (aproximadamente 4,7V na saída do circuito) quando exposto à intensidade máxima de luz e que a variação da saída é fortemente dependente da temperatura. Entretanto, o efeito da fotossensibilidade é dominante em relação ao efeito térmico para os níveis de luz e temperatura abordados no experimento. Para temperaturas mais altas, é possível que o efeito térmico supere o efeito ótico consequentemente, seria necessário que o filme fosse iluminado com maior intensidade de luz para que o efeito da fotossensibilidade fosse perceptível.

Um modelo foi obtido para a relação entre a variação da saída (ΔY) e a temperatura (T) por meio de um ajuste de curva a uma função polinomial de 2ª ordem em MATLAB conforme equação 3.16.

$$\Delta Y = p_1 T^2 + p_2 T + p_3 \quad (3.16)$$

Sendo $p_1=0,006571$; $p_2=-0,6196$; $p_3=15,4$ os parâmetros do modelo e a temperatura em $^\circ\text{C}$.

Outro resultado relevante é que o filme apresenta assimetria dinâmica isto é, o tempo de subida é diferente do tempo de decaimento. Isto foi observado na Tabela 3.1 e, apesar de não ter sido encontrado a explicação deste efeito presente nos LDRs, ele pode ser provavelmente

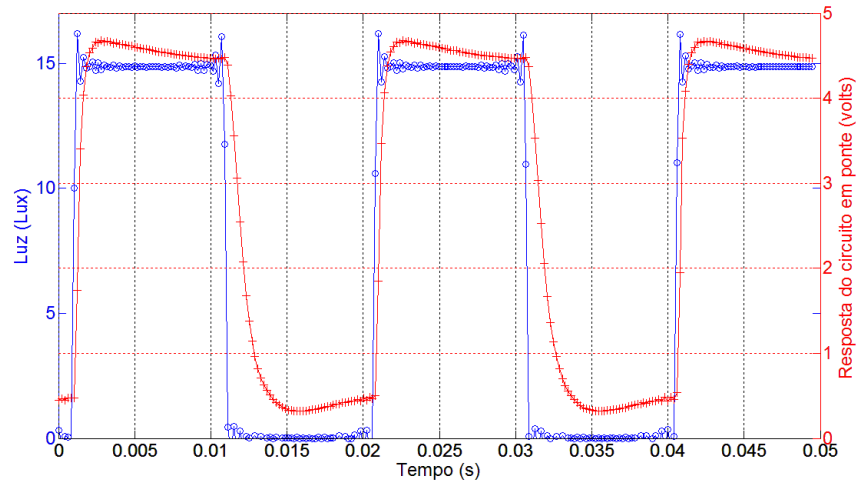
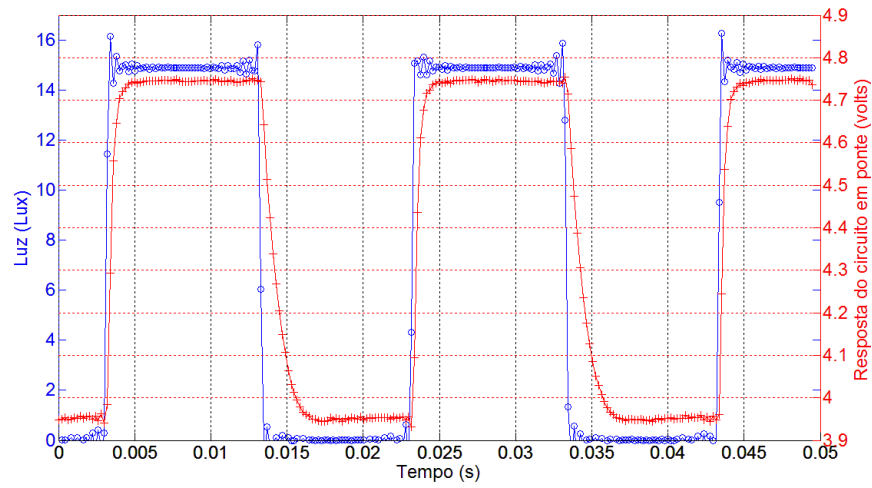
(a) Temperatura do filme = 25°C .(b) Temperatura do filme = 45°C .

Figura 3.14: Caracterização dinâmica do filme. Entrada em degrau da luz (o) e saída do circuito em ponte (+).

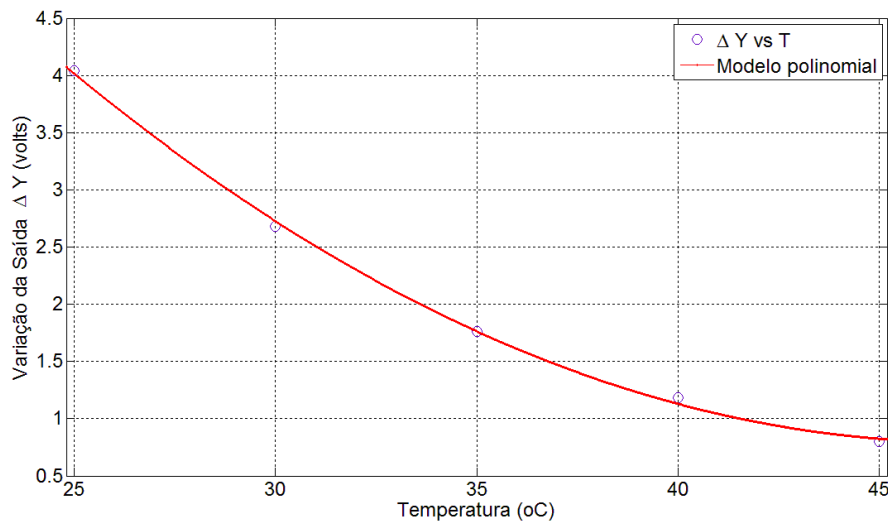


Figura 3.15: Modelo polinomial da variação da saída em função da temperatura.

atribuído aos diferentes tempos de recombinação dos portadores de carga nas transições entre as fases clara e escura. Embora os LDRs apresentem tempo de resposta mais lento para temperaturas mais baixas [23], tal efeito não foi observado para a faixa de temperatura estudada no filme de SnO_2 . A Tabela 3.2 sumariza os resultados experimentais.

Tabela 3.2: Parâmetros da resposta dinâmica do filme de SnO_2

Temperatura (°C)	Tempo de Subida (ms)	Tempo de Decaimento (ms)	ΔY (volts)
25	0,4	1,1	4,04
30	0,4	1,1	2,68
35	0,4	1,1	1,76
40	0,4	1,1	1,18
45	0,4	1,1	0,8

A resposta ao degrau de luz do filme de SnO_2 revela comportamento típico de sistemas de segunda ordem de fase não-mínima e tempo morto [34]. Esta última característica pode indicar a presença de zeros e o tempo morto provavelmente pode ser atribuído a não linearidades da física do filme. Não é escopo deste trabalho realizar a modelagem dinâmica do filme. Apesar desta informação ser complementar à caracterização do material, ela é dispensável para o desenvolvimento do circuito fotodetector objetivado neste trabalho.

Adicionalmente, o filme de SnO_2 também foi submetido à excitação harmônica na faixa

de frequência entre 30 e 2000 Hz . As Figuras 3.16(a) e 3.16(b) apresentam a resposta para as frequências de 50 e 500Hz respectivamente.

Para melhor visualização, o componente DC do sinal de saída do circuito foi removido. Observa-se neste gráfico também o efeito da assimetria da resposta com um pouco de distorção na saída.

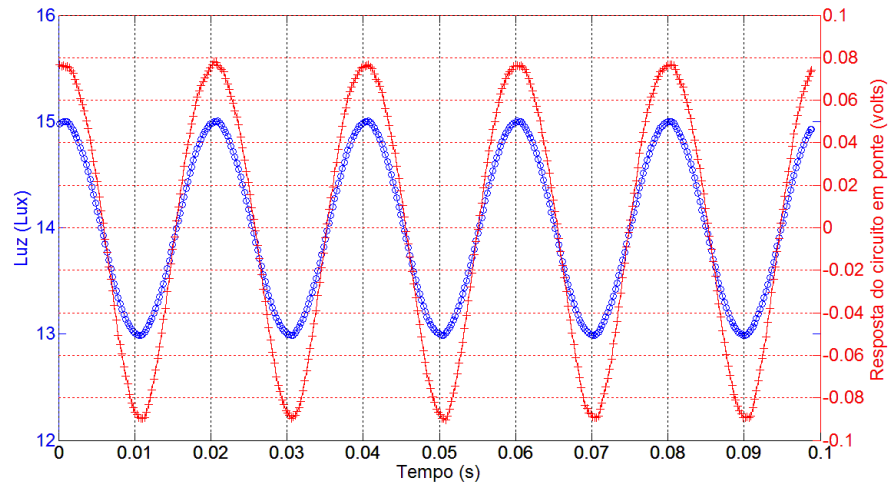
A partir dos resultados experimentais, obteve-se o diagrama de Bode do filme. O comportamento assintótico do diagrama indica a provável presença de um zero na frequência de 10 Hz e três pólos em 40, 180 e 550 Hz reforçando as observações extraídas da resposta ao degrau. Para uma aproximação mais simples a um sistema de 1ª ordem, tem-se que a atenuação de 3dB ocorre para a frequência de 650 Hz implicando que a utilização do filme não é favorável para frequências mais altas que esta.

3.4 Conclusões

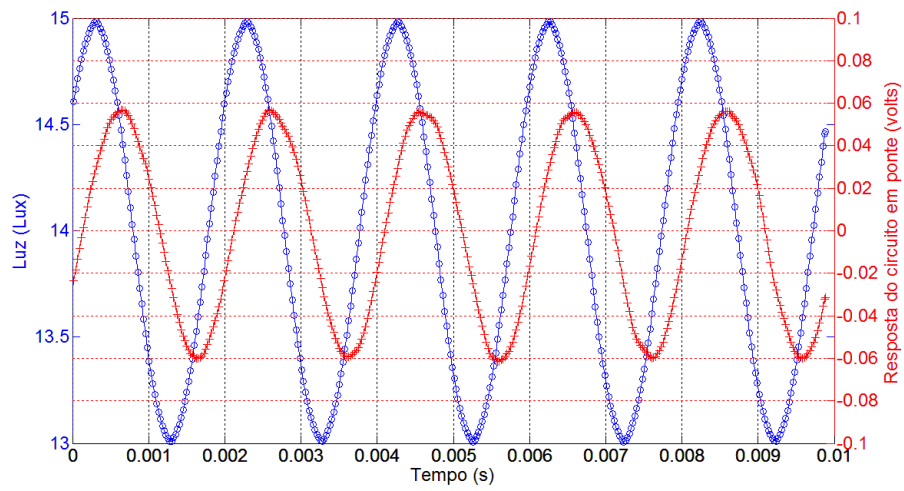
As caracterizações elétricas realizadas neste capítulo permitem verificar a natureza semicondutora do filme de SnO_2 sintetizado no laboratório.

As similaridades observadas em relação aos NTC's e aos LDRs sugerem que o filme pode ser utilizado tanto como sensor de temperatura quanto de luz. Para o segundo caso, é desejável que o sensor opere com baixas temperaturas a fim de se obter melhor fotossensibilidade. Esta propriedade foi verificada com melhores resultados em pressão subatmosférica devido à redução da interferência do oxigênio e umidade, portanto, um encapsulamento adequado poderá tornar o filme de SnO_2 uma alternativa para uso comercial em substituição ao CdS.

O conjunto de resultados são suficientes para o projeto de um sistema de medição de luz com compensação da temperatura.

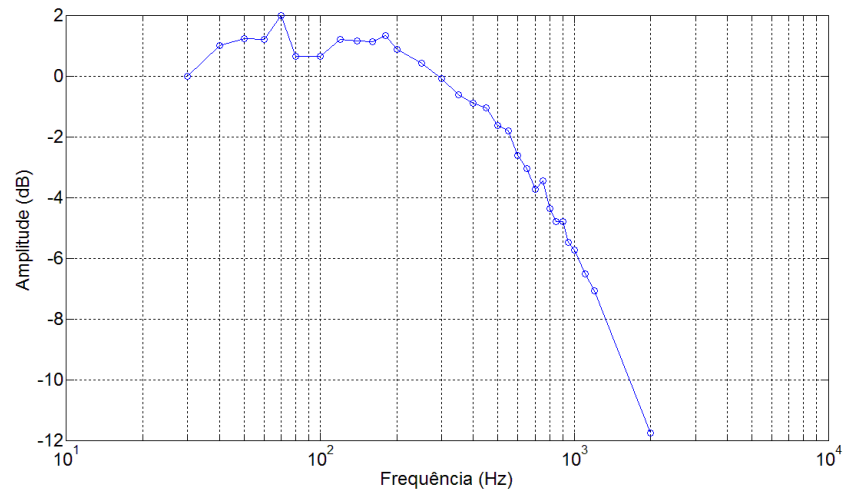


(a) Resposta à excitação harmônica de 50Hz.

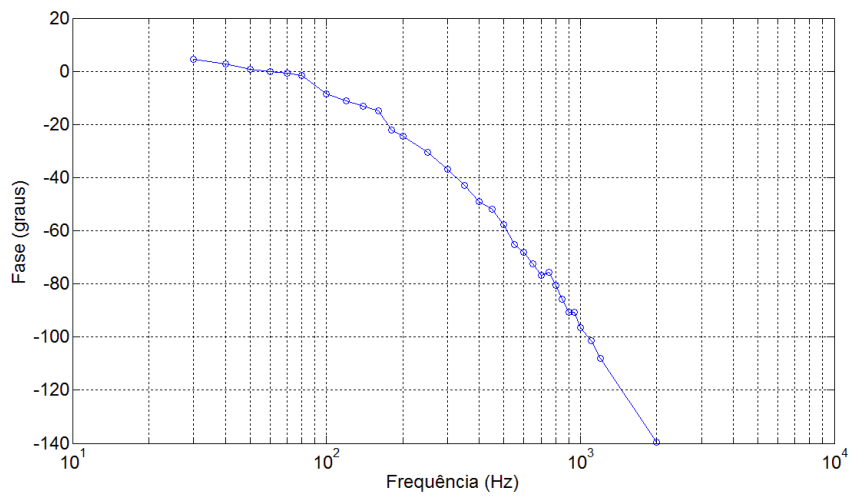


(b) Resposta à excitação harmônica de 500Hz.

Figura 3.16: Caracterização dinâmica do filme. Entrada senoidal da luz (o) e saída do circuito em ponte (+) com temperatura do filme = 25°C .



(a) Diagrama de bode de amplitude.



(b) Diagrama de bode de fase.

Figura 3.17: Resposta em frequência do filme de SnO_2 .

Capítulo 4

Desenvolvimento de um fotodetector microcontrolado utilizando SnO_2

Este capítulo apresenta a concepção de um circuito fotodetector microcontrolado utilizando filmes de SnO_2 . As rotinas de ação do microcontrolador serão descritas neste capítulo e ilustradas no Apêndice A com um conjunto de fluxogramas. Este capítulo apresenta resultados que são relevantes tanto área de materiais quanto para a área tecnológica de sensores.

4.1 Introdução

Segundo Morawski [35], um sistema de medição pode ser representado de acordo com a ilustração da Figura 4.1. O valor do mensurando x é a resposta de um transdutor estimulado por uma variável física que é processada e estimada pelo sistema de medição. As ações de conversão incluem tipicamente a aplicação de ganho, adição de componente contínua, filtragem, comparação, conversão Analógico-Digital (AD), conversão resistência-tensão entre outros. A variável y representa o resultado da conversão do mensurando. Para os casos em que o sistema é perturbado por outra variável p , o seu valor deve ser também estimado por meio de conversões para que a variável x possa ser reconstruída com o mínimo erro possível aplicando-se o operador R . Nesta situação, é necessário conhecer um modelo paramétrico que caracterize a resposta do sensor com a perturbação. Os símbolos o , $\sim$ e $\hat{}$ denotam respectivamente, o valor exato, convertido e estimado da variável.

O filme de SnO_2 obtido utilizando o processo de pulverização química foi utilizado nesta aplicação como fotodetector. Embora o filme de SnO_2 seja sensível a diversas grandezas físicas (pressão, umidade, concentração de gases e temperatura), será admitido que apenas

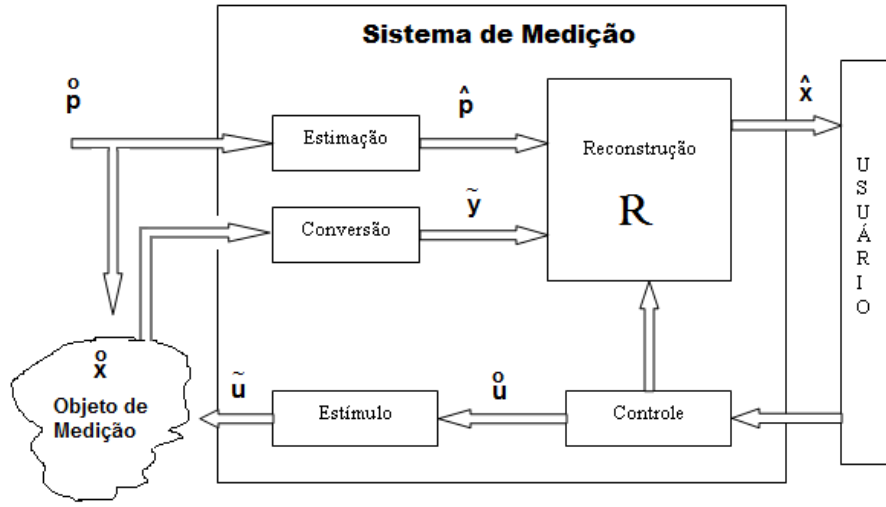


Figura 4.1: Arquitetura de um sistema de medição.

a temperatura perturbe o sistema de medição. O sinal de estímulo u aplicado será uma onda quadrada de frequência variável, a qual se deseja medir. Portanto, o sinal mensurando x será a frequência do sinal de entrada. Dessa forma, duas técnicas candidatas são apresentadas na literatura [23] para medição de frequência com sistemas microcontrolados: o sinal medido é conectado a uma entrada digital que gera uma interrupção a cada transição de borda (de subida ou descida) incrementando um registrador a cada ocorrência deste evento durante um intervalo de tempo fixo. O uso de interrupções no programa, entretanto, introduz uma incerteza devido ao tempo de latência da interrupção que é o tempo que a CPU demora para desviar o programa para o endereço do início do tratamento da interrupção. A contagem do tempo é controlada por um temporizador sincronizado pelo pulso de clock do microcontrolador. O sinal pode ser reconstruído dividindo-se o número de pulsos n pelo intervalo de tempo da medida T_o , ou ainda utilizar o valor de n para apontar uma posição de memória (tabela) que retorne o valor da frequência correspondente. Devido à falta de sincronismo entre os pulsos de entrada e o clock do MCU, a contagem pode ser interrompida imediatamente antes ou após a ocorrência de uma transição. Isto implica na incerteza de ± 1 contagem, ou seja, o resultado é $n \pm 1$.

A sensibilidade relativa do sistema é dada por:

$$S = \frac{1}{n} \quad (4.1)$$

Esta sensibilidade pode ser melhorada aumentando-se n , isto é aumentando-se o tempo de medição, mas, em contrapartida, a frequência do sinal deverá se manter estável durante este intervalo.

Alternativamente, pode-se medir um ou mais períodos T_x do sinal. Neste caso, um temporizador inicia a contagem do tempo na ocorrência da primeira transição de borda e interrompe na ocorrência do n -ésimo período. Assim, tem-se que:

$$T_x = \frac{T_o}{n} \quad (4.2)$$

O temporizador é sincronizado com o ciclo de máquina T_c do microcontrolador. Para arquiteturas RISC, o ciclo de máquina típico é de quatro períodos do sinal de clock, e para arquiteturas CISC este valor é de 12 períodos. Seja k a relação entre o período do sinal medido e o período do ciclo de máquina (T_{cm}):

$$k = \frac{T_x}{T_{cm}} \quad (4.3)$$

Consequentemente, o intervalo da medida será variável de acordo com o período do sinal:

$$T_o = nkT_c \quad (4.4)$$

onde $n.k$ é o valor inteiro armazenado no temporizador e o valor da frequência pode ser obtido pela expressão abaixo:

$$f_x = \frac{n}{nkT_{cm}} \quad (4.5)$$

A primeira técnica apresenta melhores resultados para medição de altas frequências, enquanto a segunda adequa-se melhor a medição de sinais de frequências mais baixas devido ao menor tempo de medição. Porém, é importante ressaltar que quanto mais alta a frequência, maior será o grau de incerteza introduzido pelo tempo de latência da interrupção. A concepção do fotodetector utilizando o filme de SnO_2 será realizada a partir das caracterizações obtidas no Capítulo 3 e será apresentada em diagrama de blocos com o detalhamento do hardware e software.

4.2 Procedimento experimental

4.2.1 Visão geral do sistema de medição

O sistema de medição é ilustrado em diagrama de blocos na Figura 4.2. O microcontrolador *PIC16F877A* da Microchip foi escolhido para desempenhar a função central do

sistema de medição devido ao seu baixo custo e disponibilidade de uma plataforma de prototipagem em laboratório. Suas principais características são: arquitetura RISC com 35 instruções, 14kB de memória de programa, 368 bytes de RAM, 256 bytes de memória EEPROM e conversor AD interno de 10 bits com 8 canais [36]. O tempo de latência deste MCU é de 3 a 3,75 ciclos de instrução. Para frequência de clock de 4MHz utilizada, o ciclo de instrução é de 1 μs , isto é, o tempo de latência é de aproximadamente 3 (se a fonte da interrupção for interna) a 3,75 μs (fonte de interrupção externa).

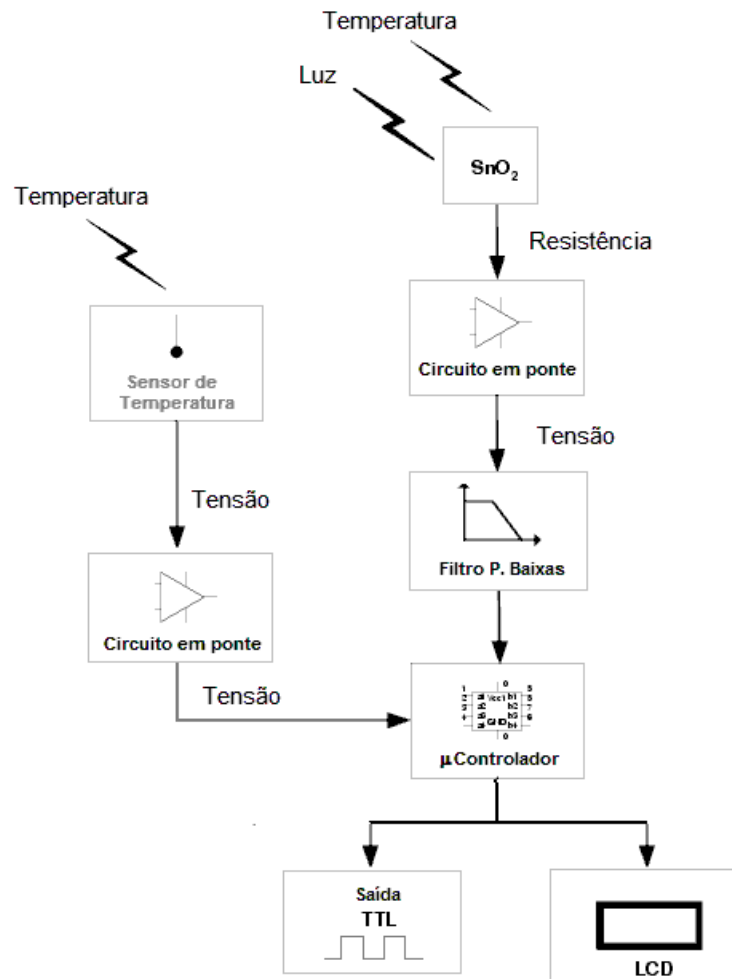


Figura 4.2: Visão geral do sistema de medição do fotodetector.

Os sinais dos sensores de luz (SnO_2) e temperatura (LM35) são submetidos a conversões analógicas e posteriormente digitalizados pelo conversor AD do MCU. A reconstrução destas variáveis é realizada matematicamente via *software*. A ausência de um circuito multiplicador em sua Unidade Lógica Aritmética (ULA) torna necessário que estas operações sejam efetuadas com rotinas matemáticas fornecidas pelo fabricante [37], o que aumenta o tempo de processamento, porém não compromete o desempenho da aplicação.

A Figura 4.3 ilustra em diagrama de blocos as conversões e estimação da temperatura do filme.

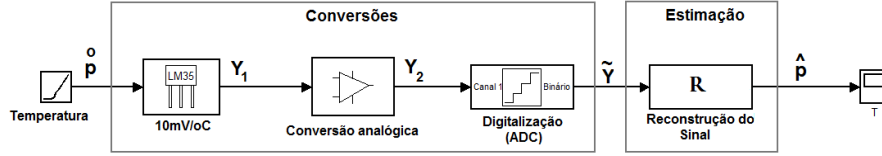


Figura 4.3: Sistema de Medição da Temperatura.

O $LM35$ gera uma tensão proporcional à temperatura em sua saída (Y_1) a uma taxa de $10mV/^{\circ}C$ na faixa de 0 a $150^{\circ}C$. O sensor apresenta exatidão de $\frac{1}{2}^{\circ}C$ à temperatura ambiente e não-linearidade de $\pm\frac{1}{4}^{\circ}C$. Um circuito de condicionamento analógico amplifica o sinal do sensor expandindo a escala de temperatura entre 1 e $4V$ (Y_2) que por sua vez é digitalizado $\tilde{y}$ com resolução de 8 bits. Esta operação permite melhorar a resolução da medida de $1,98^{\circ}C$ para $0,98^{\circ}C$, e ainda, detetar falha de conexão do sensor de temperatura ao circuito se o sinal medido for inferior a $1V$. Neste caso, um alarme foi configurado para caso a tensão do circuito seja inferior a $0,8V$. As curvas características do sensor de temperatura e do circuito proposto são ilustradas na Figura 4.4.

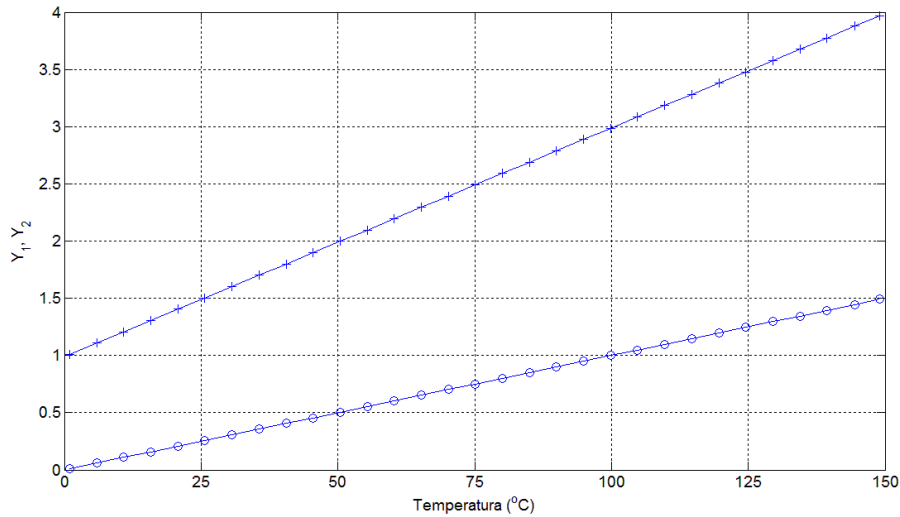


Figura 4.4: Curva característica do LM35 (o) e do circuito amplificador (+)

A equação característica do circuito amplificador proposta por Mancini [38] é dada pela equação 4.6:

$$Y_2 = mY_1 + b \quad (4.6)$$

Os parâmetros m e b são calculados substituindo-se os valores de Y_1 e Y_2 especificados na equação 4.6:

$$1 = m \cdot 0 + b \quad (4.7)$$

$$4 = m \cdot 1,5 + b \quad (4.8)$$

Obtém-se como resultados $m=2$ e $b=1$. A topologia do circuito escolhida compreende um somador amplificador e uma tensão de referência conforme pode ser visto na Figura 4.5.

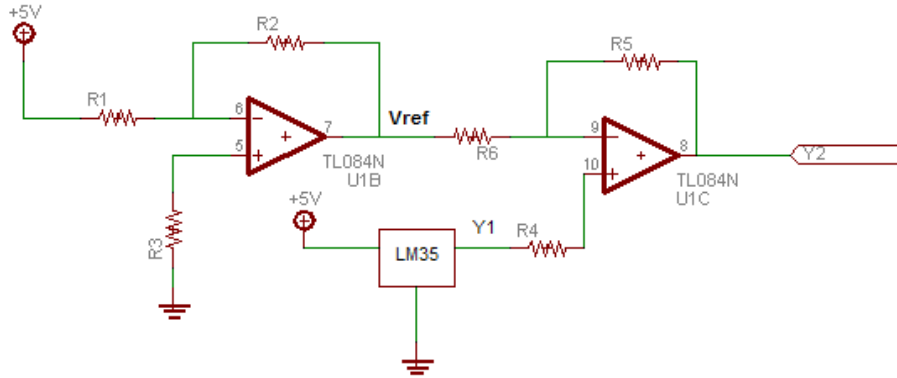


Figura 4.5: Circuito conversor do sinal do sensor de temperatura.

As equações que descrevem o circuito são obtidas aplicando-se a Lei dos Nós de Kirchoff:

$$\frac{V_{ref} - Y_1}{R_6} = \frac{Y_1 - Y_2}{R_5} \quad (4.9)$$

$$Y_2 = Y_1 \frac{R_5 + R_6}{R_6} - V_{ref} \frac{R_5}{R_6} \quad (4.10)$$

Sendo que:

$$V_{ref} = -5 \frac{R_2}{R_1} \quad (4.11)$$

Substituindo-se os valores de m e b na equação 4.10, pode-se obter os valores das resistências:

$$\frac{R_5 + R_6}{R_6} = 2 \quad (4.12)$$

$$-V_{ref} \frac{R_5}{R_6} = 1 \quad (4.13)$$

Logo, $R_5 = R_6$ e $V_{ref} = -1$ V. R_2 e R_1 podem ser calculadas a partir da equação 4.11

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{1}{5} \quad (4.14)$$

Os valores das resistências utilizadas foram: $R_1 = 100k$, $R_2 = 20k$, $R_3 = 16,7k$, $R_4 = 4,7k$, $R_5 = R_6 = 10k$.

A abordagem utilizada no projeto do circuito linear tem como premissa as características ideais do amplificador operacional, que, neste caso, foi o TL084. Entretanto, é importante citar alguns parâmetros não ideais deste dispositivo, tais como o coeficiente de temperatura do *offset* de entrada de $18\mu V/^\circ C$, *slewrate* de $13V/\mu s$ e distorção harmônica total de $0,003\%$. Para as condições de operação neste experimento específico, estas características não apresentam efeito significativo.

A Figura 3.11 mostra que o filme de SnO_2 apresenta baixa fotossensibilidade para altas temperaturas. Assim, a temperatura máxima de trabalho projetada para o funcionamento do fotodetector é de $50^\circ C$, e um alarme é gerado se este valor for ultrapassado. O resultado da conversão AD em decimal é dada pela equação 4.15 e representada graficamente na Figura 4.6.

$$\tilde{y} = \frac{Y_2}{5} 255 \quad (4.15)$$

A estimação da temperatura pode ser realizada subtraindo-se o resultado da conversão AD por 52 de acordo com a equação 4.16.

$$\hat{p} = \tilde{y} - 52 \quad (4.16)$$

O erro do cálculo da temperatura pelo MCU ($\hat{p} - \hat{p}$) pode ser visualizado na Figura 4.7. Nota-se que o erro máximo é de $+1^\circ C$ para na faixa de operação projetada para o sistema de medição, e que este ocorre para temperaturas abaixo de $25^\circ C$.

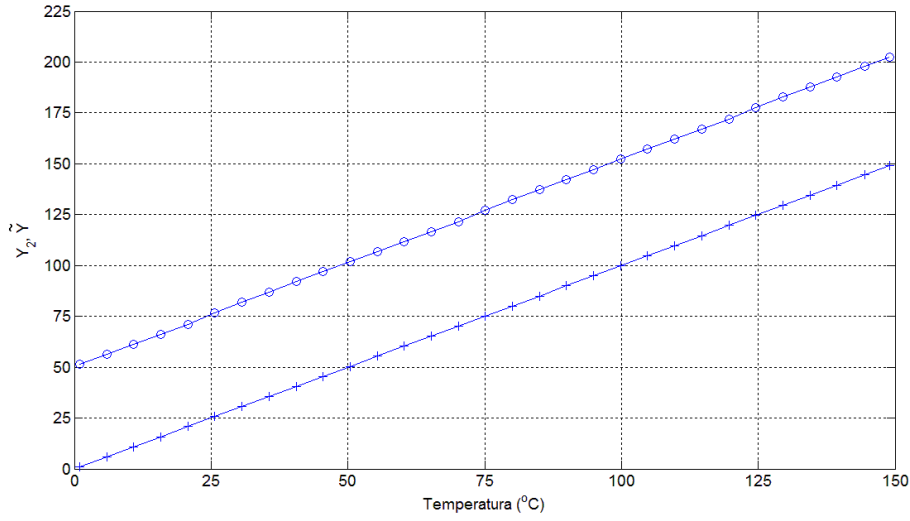


Figura 4.6: Temperatura do filme $\tilde{p}$ (+), e o valor digitalizado $\tilde{Y}$ (o).

Tabela 4.1: Alarmes de temperatura

Alarme	Tensão (Y_2)	Decimal
Falha de conexão	0,8V	41 ₁₀
Alta temperatura	2,0V	103 ₁₀

Os valores de alarme estabelecidos pelo sistema são sintetizados na Tabela 4.1:

O filme de SnO_2 é estimulado por um LED com uma onda quadrada com frequência entre 20 e 100Hz. O processamento da resposta do filme é representado na Figura 4.8.

A resposta típica do filme ao chaveamento da luz (ver Figura 4.9) é convertida em tensão por meio do circuito em ponte da Figura 4.10 cuja saída é filtrada por uma rede RC passa baixas com ganho estático 0,5 e frequência de corte de 2,59kHz. A equação característica do circuito é dada por:

$$Y = (K_1 + K_2 R_s) \frac{1}{2 + \omega \cdot s} \quad (4.17)$$

com $K_1 = 11,4 \text{ V}$, $K_2 = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ V}/\Omega$, $\omega = 1,23 \cdot 10^{-4} \text{ rad.s}^{-1}$ e R_s é a resistência do filme de SnO_2 . O desenvolvimento das equações deste circuito foi discutido no 3 e, portanto, seus detalhes serão omitidos nesta seção. A digitalização é realizada com taxa de amostragem de 10kHz e resolução de 10 bits.

Foi visto anteriormente que a variação do sinal de saída do circuito e o *offset* são

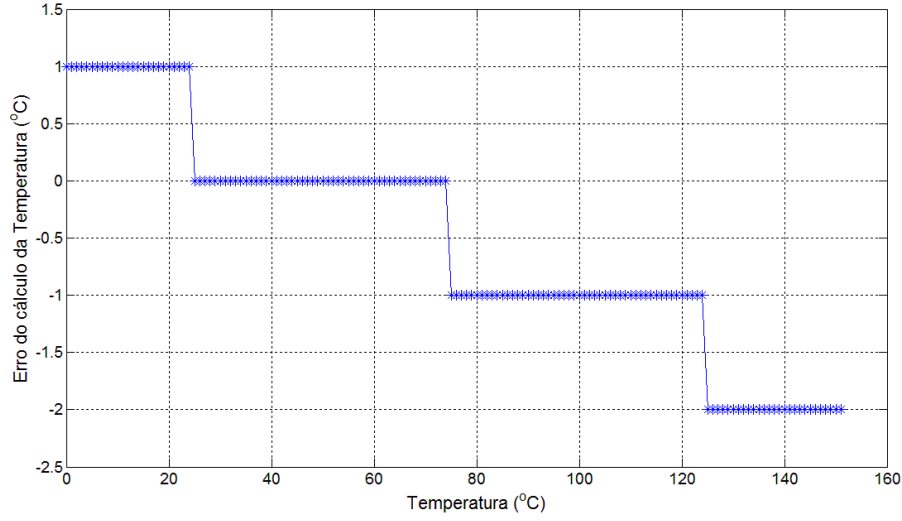
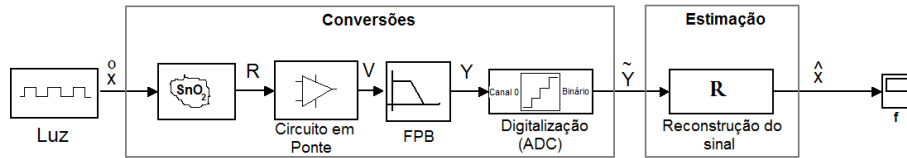

 Figura 4.7: Erro do cálculo da temperatura ($\hat{p} - p$).


Figura 4.8: Sistema de medição a frequência da luz.

dependentes da temperatura (ver Figuras 3.14(a) e 3.14(b)). Portanto o sinal não apresenta características ideais de sinais digitais para uso como uma entrada de interrupção externa do microcontrolador. As topologias de circuito mais usuais de tratamento analógico de fotocélulas [26,30] fazem uso de um circuito comparador analógico conforme ilustrado pela Figura 4.11. Entretanto, a compensação da temperatura torna-se um pouco mais complexa, e, por isto, optou-se por tratar os sinais de temperatura e luz digitalmente minimizando ainda, o tamanho do circuito. O microcontrolador monitora continuamente a saída do circuito em ponte e incrementa um contador a cada transição de borda de subida do sinal durante um intervalo de tempo fixo T_o . O limiar de detecção é determinado como 50% da variação do sinal e é tabelado na memória do microcontrolador para cada 5°C entre 25 e 45°C (ver Tabela 4.2).

O resultado da conversão AD e da estimativa são dadas pelas equações 4.19 e 4.18:

$$\tilde{y} = V \frac{1023}{5} \quad (4.18)$$

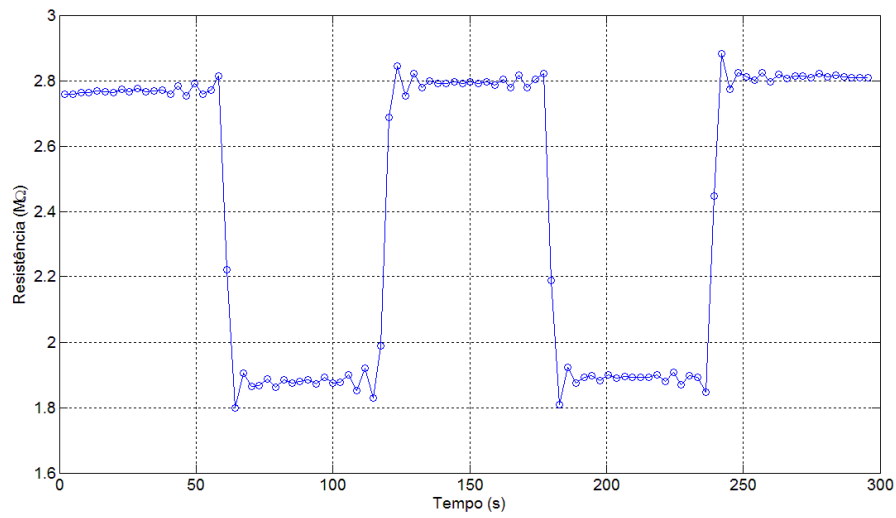


Figura 4.9: Resposta do filme de SnO_2 ao chaveamento da luz.

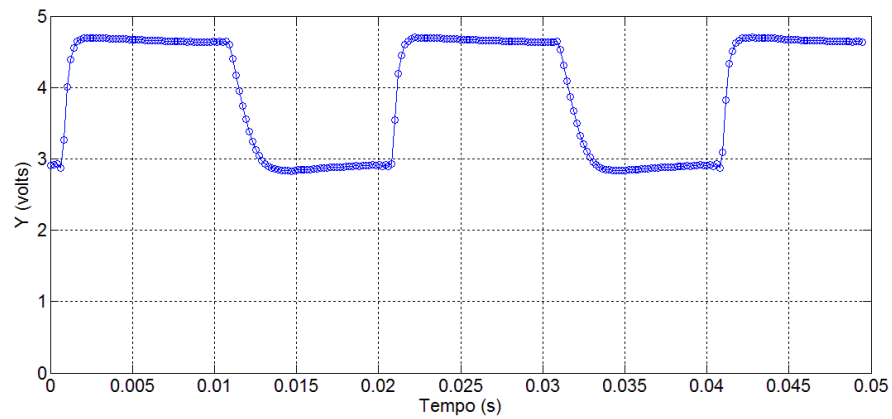


Figura 4.10: Resposta do circuito conversor R/V.

Tabela 4.2: Tabela de parâmetros para compensação da temperatura

Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	V_o min (V)	V_o max (V)	Limiar de detecção (V)	Limiar de detecção (decimal)
25	0,3	4,6	2,5	128_{10}
30	1,8	4,7	3,3	166_{10}
35	2,9	4,7	3,8	194_{10}
40	3,6	4,8	4,0	209_{10}
45	4,0	4,8	4,4	222_{10}

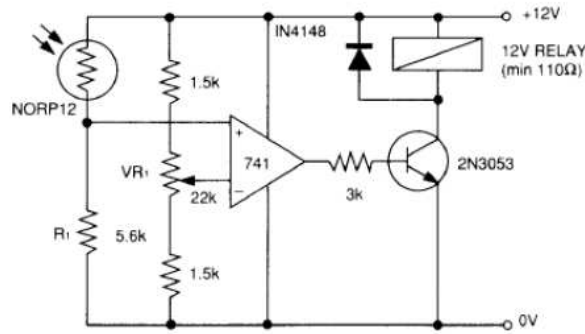


Figura 4.11: Circuito típico de tratamento analógico de fotocélulas.

$$\hat{x} = \frac{n}{T_o} \quad (4.19)$$

Em que: n é o valor do contador no final do tempo de medição T_o . Um display LCD caractere 16x2 comunicando com 4 vias de dados e duas vias de controle informa ao usuário o resultado de medição e alarmes de operação do sistema. As rotinas de atualização do LCD são propostas por Zanco [39]. Adicionalmente, uma saída TTL com a mesma frequência do sinal de entrada também é disponibilizada em um dos pinos de saída (Figura 4.12). O diagrama do circuito fotodetector é apresentado na Figura 4.13.

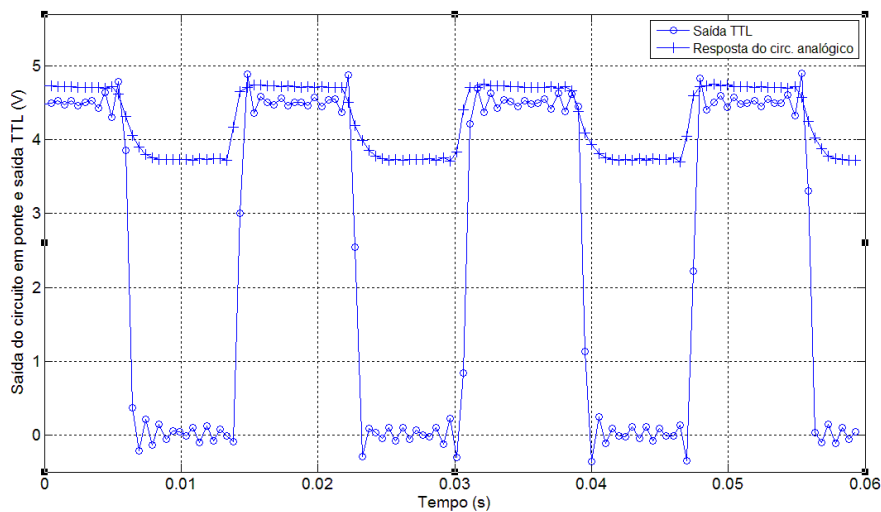


Figura 4.12: Resposta do circuito analógico e saída TTL

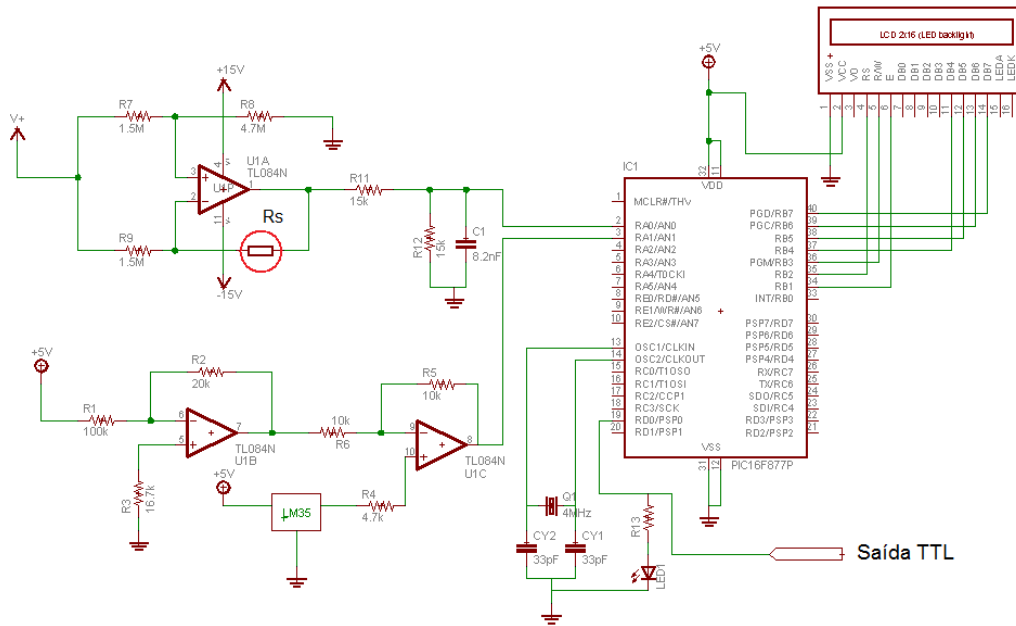


Figura 4.13: Esquema do circuito fotodetector microcontrolado

4.2.2 Implementação do software

O *software* foi escrito em linguagem *Assembly* utilizando o ambiente integrado de desenvolvimento da Microchip *MPLAB IDE* e se encontra listado no Apêndice B.

No início do programa, os registradores internos, as portas de entrada/saída (E/S) e o LCD são configurados. O LCD é testado e uma mensagem de apresentação é mostrada: *SnO₂ thin film photodetector* durante 2 segundos. O programa então executa a rotina principal *Main* ilustrada na Figura A.1. No início da rotina *Main*, o microcontrolador faz a leitura da temperatura e determina se esta grandeza está acima do limite de operação (50°C). Caso afirmativo, um *bit* de alarme é setado e a mensagem "Alarm! High Temperature" é apresentada no LCD até que a temperatura se normalize. Nenhuma leitura do sinal de luz é realizada nesta situação. Se a temperatura estiver dentro do limite especificado, o programa determina o limiar de detecção de borda do pulso de luz (saída do circuito em ponte) a partir da tabela armazenada em sua memória ROM conforme fluxograma da Figura A.4.

A conversão AD dos sinais da temperatura e de luz é realizada pelo MCU e uma rotina de cálculo de média, filtra o resultado de quatro conversões consecutivas. Os resultados das conversões são armazenados nos quatro registradores internos de 16 bits (2 *bytes*) chamados de *Input_Avg1*, *Input_Avg2*, *Input_Avg3* e *Input_Avg4* e o resultado final da média é armazenado no registrador *Output_Avg* (ver Figura A.2). As rotinas de medição de luz e

Tabela 4.3: Resultado de medição de frequência usando o circuito fotodetector

FCL (Hz)	<i>Temperatura = 25°C</i>		<i>Temperatura = 30°C</i>		<i>Temperatura = 35°C</i>		<i>Temperatura = 40°C</i>		<i>Temperatura = 45°C</i>	
	Max (Hz)	Min (Hz)	Max (Hz)	Min (Hz)	Max (Hz)	Min (Hz)	Max (Hz)	Min (Hz)	Max (Hz)	Min (Hz)
20	20	19	21	19	20	20	20	20	21	23
40	40	39	41	40	40	40	40	40	44	41
60	60	60	61	60	60	60	60	60	62	60
80	81	79	81	80	80	79	80	80	81	80
100	100	100	102	100	100	99	100	100	101	100

FCL = Frequência de Chaveamento da Luz

temperatura utilizam este registrador como resultado da conversão AD.

A rotina de medição de frequência faz a leitura do canal 0 do conversor AD durante a quantidade de segundos armazenada no registrador *Seconds*. O temporizador interno *TIMER0* é inicializado e gera uma interrupção a cada 8ms. Um registrador auxiliar *TIME_UP* inicializado com o valor 125 é decrementado a cada ocorrência da interrupção sinalizando o término do período de um segundo quando seu valor é zerado e, em seguida, o registrador *Seconds* é também decrementado. Quando o registrador *Seconds* é zerado, um bit de sinalização (*flag ENDTIME*) indica o término do período de medição da frequência. A contagem de pulsos de luz é feita pelo registrador *Pulse_Counter* que é zerado no início da rotina e incrementado sempre que o sinal de luz cruza o limiar de detecção na borda de subida. Além disso, a saída TTL (registrador *Freq_out*) é também setada neste caso, sendo apagada quando houver transição de descida do sinal do sensor. Ao final da rotina, a frequência do sinal de luz é calculada dividindo-se o registrador *Pulse_Counter* por *Seconds* com sensibilidade definida pela equação 4.1, em que n é dado por *Pulse_Counter*. A Figura A.5 sumariza a rotina de medição de frequência.

4.3 Resultados e discussão

A tabela 4.3 apresenta os resultados obtidos para 10 amostras (20 segundos) de chaveamento da luz na faixa de frequência de 20 a 100 Hz com diferentes temperaturas.

O sistema de medição apresenta bom desempenho com maior erro para a temperatura de 45°C. Isto pode ser atribuído à diminuição da faixa de variação da saída do circuito analógico e aumento do ruído do fotodetector. Melhor precisão pode ser obtida aumentando-se o valor do registrador *Seconds*, isto é, aumentando-se o intervalo de medição T_o , entretanto isto implicará que a frequência do sinal seja estável durante este intervalo de tempo. Adicionalmente, o registrador *Pulse_Counter* que é de 8 bits para o exemplo avaliado, terá que ser de 16 bits para suportar o valor da contagem. Isto teria que ser feito também para medição de frequências mais altas. Outro erro intrínseco da reconstrução dos sinais

de temperatura e frequência é o erro de arredondamento cometido nas rotinas matemáticas de multiplicação e divisão.

A saída TTL apresenta a mesma frequência do sinal do fotodetector e pode ser utilizado por um outro circuito externo.

4.4 Conclusões

Neste capítulo, foi apresentado um sistema de medição de frequência de luz utilizando o filme de SnO_2 como fotodetector com bom desempenho. A dependência da fotossensibilidade com a temperatura é de grande relevância e nota-se que a sua operação é otimizada quanto menor for a temperatura. Respeitando-se a limitação dinâmica do filme, outras aplicações de instrumentação podem ser desenvolvidas com o arranjo experimental proposto, tais como sensor de barreira para aplicações em sistemas alarme de segurança ou posicionamento, medição de baixa rotação, entre outras.

Capítulo 5

Conclusões

Neste trabalho desenvolveu-se a síntese, caracterização, modelagem e desenvolvimento de um circuito fotodetector utilizando filmes de dióxido de estanho nanoestruturado.

Uma plataforma de baixo custo foi construída para deposição de filmes de SnO_2 utilizando a técnica de *spray*. Quatro plataformas experimentais foram desenvolvidas para caracterização do filme em função da presença de gases, da temperatura e da intensidade de luz na faixa do espectro visível. Estas plataformas encontram-se disponíveis no Laboratório de Filmes Nanoestruturados da UFBA para desenvolvimentos de trabalhos futuros.

Os resultados obtidos nestas caracterizações fundamentaram o desenvolvimento de um circuito eletrônico para medição de luz com compensação da temperatura, entretanto, caracterizações adicionais são de grande importância para melhor compreensão dos fenômenos envolvidos bem como para o estudo dos limites de aplicação do material. O protótipo do circuito fotodetector apresentou resultados relevantes para demonstrar possibilidades de uso do filme de SnO_2 . A técnica utilizada para realizar a medição de frequência do chaveamento de luz sobre o filme apresentou resultados satisfatórios, entretanto pode-se conseguir melhor precisão em baixas frequências por meio da medição de período.

A propriedade da fotossensibilidade é de grande destaque e potencializa o desenvolvimento de novas aplicações para o material.

Sugestões para outros trabalhos de pesquisa

Estas sugestões têm por objetivo dar prosseguimento às investigações sobre síntese e a caracterização de novos sensores constituídos de filmes de SnO_2 . Os principais trabalhos identificados para serem desenvolvidos são:

- Modelar a propriedade da fotossensibilidade com o espectro da luz;
- Estudar a otimização dos parâmetros de deposição para obtenção de filmes com melhor fotossensibilidade e uniformidade desta característica;
- Modelar a dependência do filme com a presença de umidade;
- Estudar o efeito do autoaquecimento do filme quando polarizado com uma corrente de teste;
- Estudar e modelar a histerese da dependência térmica do filme de SnO_2 ;
- Otimizar as plataformas experimentais para obter filmes homogêneos de maior área superficial;
- Desenvolver técnicas para melhorar o contato ôhmico dos filmes;
- Estudar e desenvolver novas aplicações para uso comercial do filme de SnO_2 .

Apêndice A

Fluxograma das rotinas do microcontrolador do circuito fotodetector

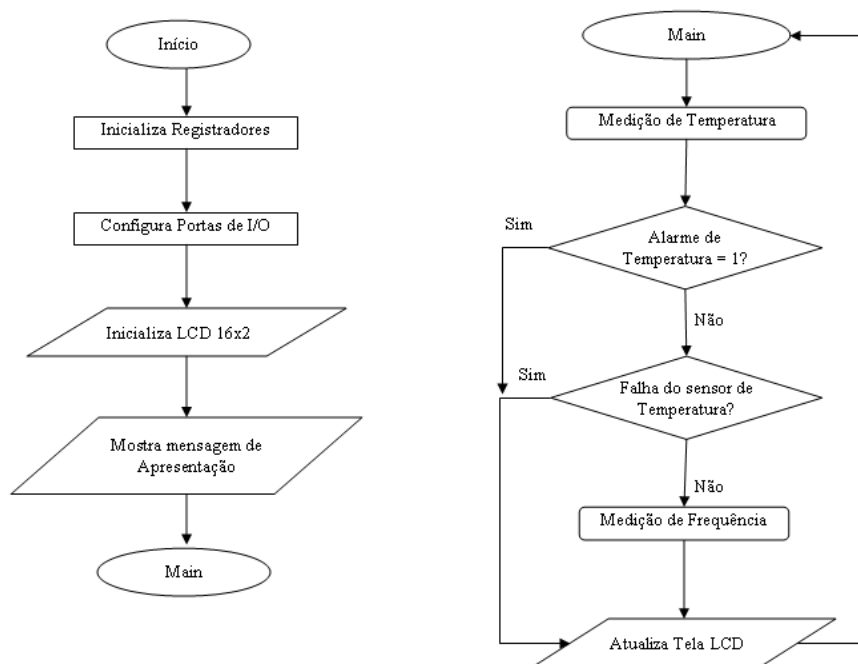


Figura A.1: Fluxograma das rotinas *Início* e *Main*.

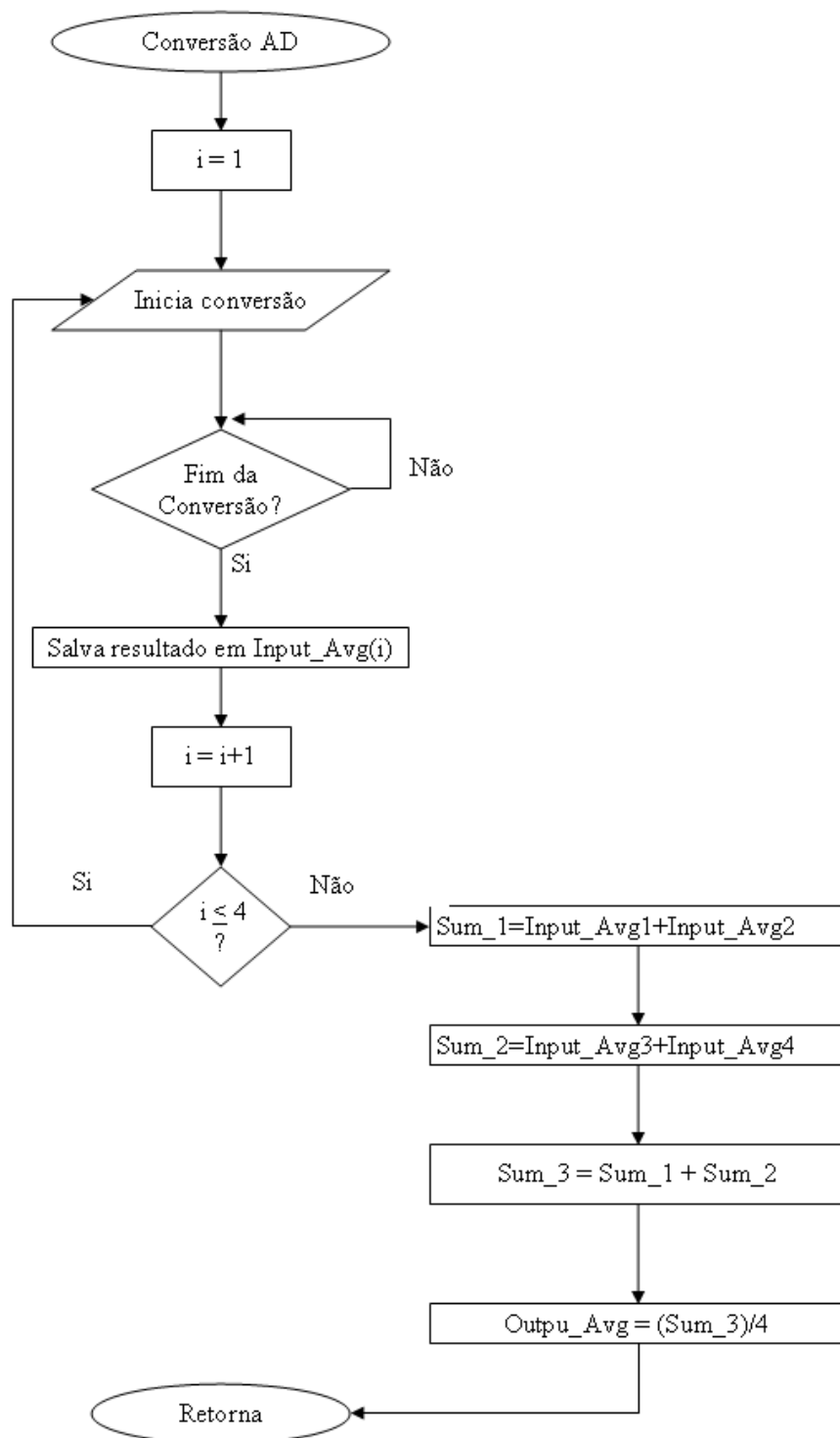


Figura A.2: Fluxograma da rotina de conversão AD.

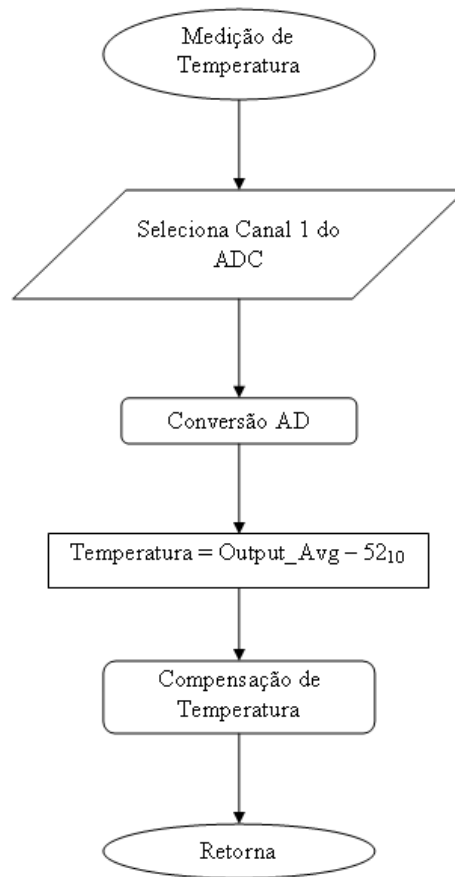


Figura A.3: Fluxograma da rotina de medição de temperatura.

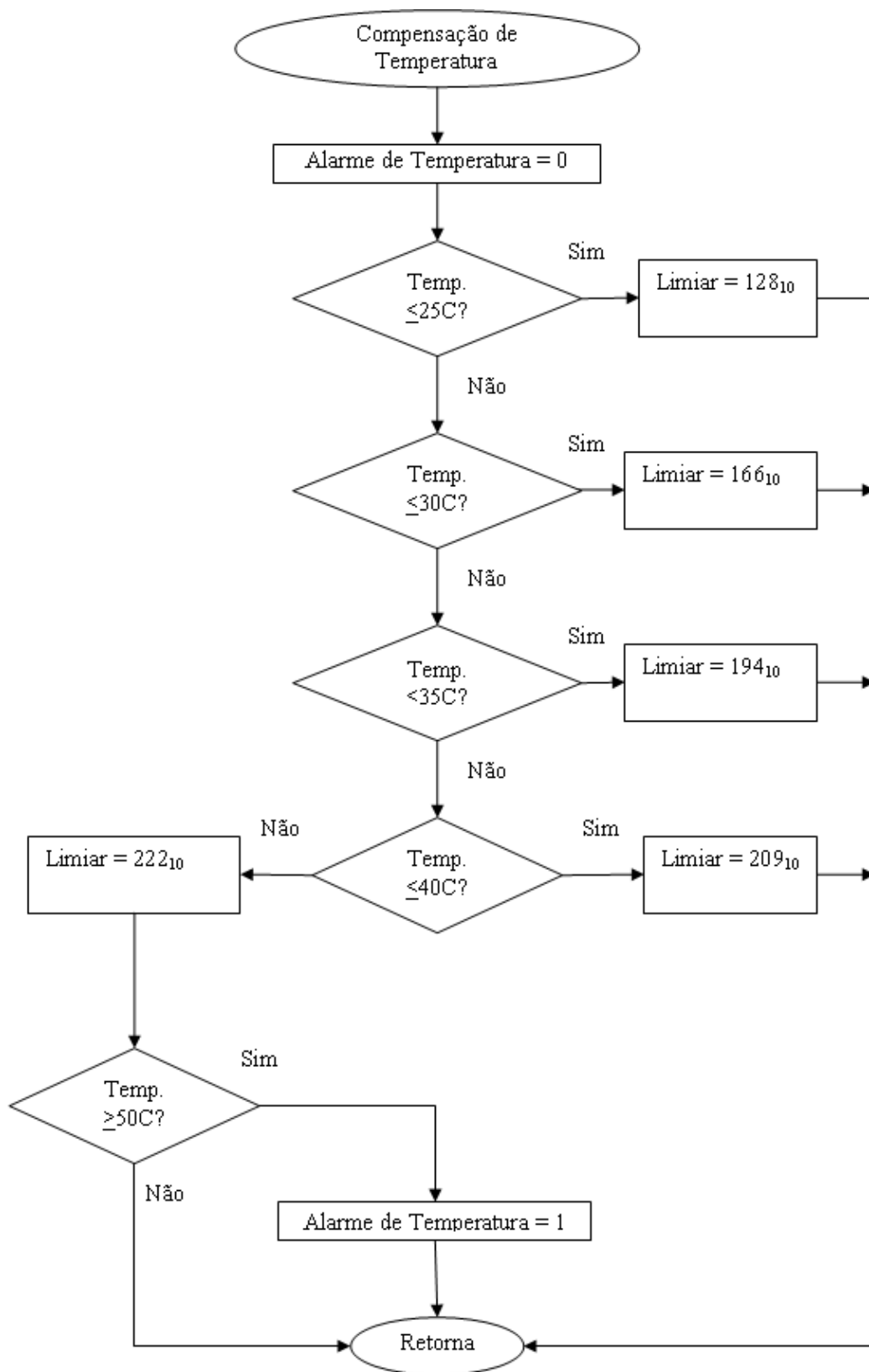


Figura A.4: Fluxograma da rotina de compensação de temperatura.

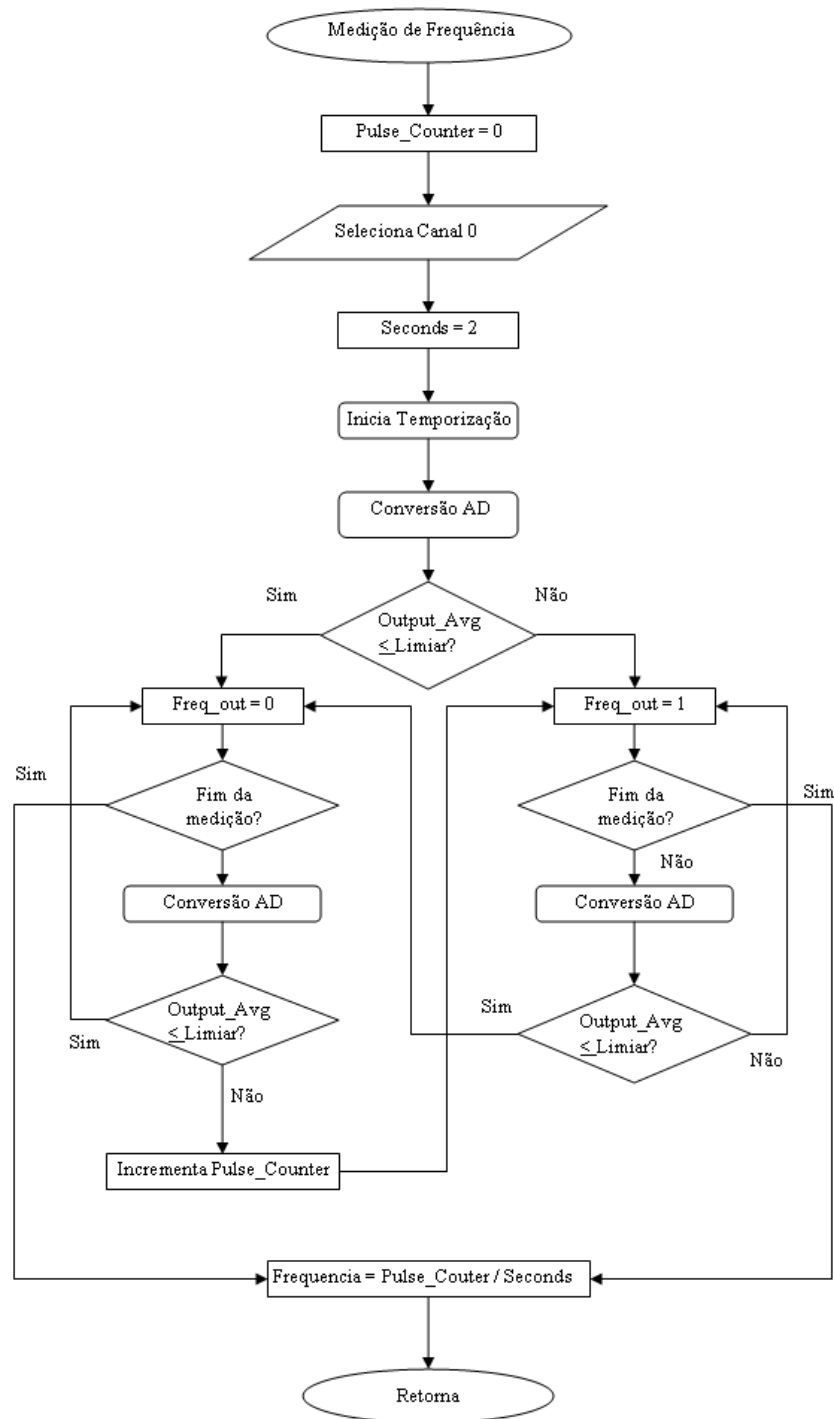


Figura A.5: Fluxograma da rotina de medição de frequência.

Apêndice B

Programa do microcontrolador do circuito fotodetector

```
%; * * * * *
%; *          FOTODETETOR UTILIZANDO FILME DE SnO2          *
%; *
%; * * * * *
%; *    POR: NILO MATIAS                                     *
%; *    VERSÃO : 1.1                                         *
%; *    DATA : 18 DE FEVEREIRO, 2009                        *
%; * * * * *
%;

%; * * * * *
%; *          CONFIGURAÇÕES PARA GRAVAÇÃO                  *
%; * * * * *

__CONFIG _CP_OFF & _CPD_OFF & _DEBUG_OFF & _LVP_OFF & _WRT_OFF
& _BODEN_OFF & _PWRTE_ON & _WDT_OFF & _XT_OSC

#include<P16F877A.INC>

%; * * * * *
%; *          CONSTANTES                                     *
%; * * * * *
```

```

T25      EQU .77  %; TEMPERATURA DE 25C DIGITALIZADA
T30      EQU .82  %; TEMPERATURA DE 30C DIGITALIZADA
T35      EQU .87  %; TEMPERATURA DE 35C DIGITALIZADA
T40      EQU .92  %; TEMPERATURA DE 25C DIGITALIZADA
T45      EQU .97
T25 EQU .77 %; VALOR DIGITAL DA TEMPERATURA DE 25C
T30 EQU .82 %; VALOR DIGITAL DA TEMPERATURA DE 30C
T35 EQU .87 %; VALOR DIGITAL DA TEMPERATURA DE 35C
T40 EQU .92 %; VALOR DIGITAL DA TEMPERATURA DE 40C
T45 EQU .97 %; VALOR DIGITAL DA TEMPERATURA DE 45C
SP_25C EQU .128 %; SETPOINT DE CRUZAMENTO DO PULSO @ 25C
SP_30C EQU .166 %; SETPOINT DE CRUZAMENTO DO PULSO @ 30C
SP_35C EQU .194 %; SETPOINT DE CRUZAMENTO DO PULSO @ 35C
SP_40C EQU .209 %; SETPOINT DE CRUZAMENTO DO PULSO @ 40C
SP_45C EQU .222 %; SETPOINT DE CRUZAMENTO DO PULSO @ 45C
SP_50C EQU .103 %; SETPOINT DE ALARME DE TEMPERATURA
N_SECONDS EQU .2 %; NUMERO DE SEGUNDOS DA ROTINA DE MEDICAO DE FREQ
%; REGISTRADORES DO BUFFER
#define TAMANHO_BUFFER .32 %
#define END_INIC_BUFFER H'20 %
#define END_FIM_BUFFER H'3F' %
#define END_INIC_LINHA1 H'20' %
#define END_FIM_LINHA1 H'2F' %
#define END_INIC_LINHA2 H'30' %
#define END_FIM_LINHA2 H'3F' %

%; * * * * *
%; *                                RAM VARIABLES DECLARE *
%; * * * * *

CBLOCK      OX40

%; 'TEMPERATURE MEASUREMENT' VARIABLES
SETPOINT    %; SETPOINT DO LIMIAIR DE DETEÇÃO TABELADO  \\
TEMPERATURE %; RESULTADO DA MEDICAO DE TEMPERATURA\\
TEMPERATURE_D1 %; DIGITO DA UNIDADE DA TEMPERATURA EM DECIMAL(LSB)\\
TEMPERATURE_D2 %; DIGITO DA DEZENA DA TEMPERATURA EM DECIMAL\\

```

```

TEMPERATURE_D3      %; DIGITO DA CENTENA DA TEMPERATURA EM DECIMAL (MSB)\
FREQ_D1             %; DIGITO DA UNIDADE DA FREQUENCIA EM DECIMAL(LSB)\
FREQ_D2             %; DIGITO DA DEZENA DA FREQUENCIA EM DECIMAL\
FREQ_D3             %; DIGITO DA CENTENA DA FREQUENCIA EM DECIMAL (MSB)\
PULSE_COUNTER       %; CONTADOR DO NUMERO DE PULSOS DE LUZ\
SECONDS             %; REGISTRADOR QUE ESTABELECE PERIODO DE MEDICAO DE FREQ\
TIME_UP
INPUT_AVG4HI        %; VARIAVEIS DA ROTINA AVERAGE_4\
INPUT_AVG4LO        %; VARIAVEIS DA ROTINA AVERAGE_4\
INPUT_AVG3HI        %; VARIAVEIS DA ROTINA AVERAGE_4\
INPUT_AVG3LO        %; VARIAVEIS DA ROTINA AVERAGE_4\
INPUT_AVG2HI        %; VARIAVEIS DA ROTINA AVERAGE_4\
INPUT_AVG2LO        %; VARIAVEIS DA ROTINA AVERAGE_4\
INPUT_AVG1HI        %; VARIAVEIS DA ROTINA AVERAGE_4\
INPUT_AVG1LO        %; VARIAVEIS DA ROTINA AVERAGE_4\
RESULT_SUM1HI       %; VARIAVEIS DA ROTINA AVERAGE_4\
RESULT_SUM1LO       %; VARIAVEIS DA ROTINA AVERAGE_4\
OUTPUT_AVGHI        %; VARIAVEIS DA ROTINA AVERAGE_4\
OUTPUT_AVGLO        %; VARIAVEIS DA ROTINA AVERAGE_4\
AARGBO              %; VARIAVEIS DA ROTINA DE DIVISAO\
AARGB1              %; VARIAVEIS DA ROTINA DE DIVISAO\
BARGBO              %; VARIAVEIS DA ROTINA DE DIVISAO\
BARGB1
REMB0               %; VARIAVEIS DA ROTINA DE DIVISAO\
LOOPCOUNT          %; VARIAVEIS DA ROTINA DE DIVISAO\
FLAGS
COUNT
COUNT1
VALOR DADO_RECEBIDO
TEMP_ASC
DADO_ESC_LCD
TEMP_LCD
TEMP               %;REGS TEMPORARIO
TEMP2              %;REGS TEMPORARIO
TEMP3              %;REGS TEMPORARIO
TEMP_H             %;REGS TEMPORARIO
TEMP_L             %;REGS TEMPORARIO

```

```

MULTIP
NUMA_H
NUMA_L
NUMB_H
NUMB_L
NUM_MET
DEZ_MIL
MIL
CENT
DEZ
UNID
COUNT_T
COUNT1_T
TEMP_MULT
DADO_TEMP
W_TEMP
STATUS_TEMP
X1
%
ENDC

%; * * * * *
%; *                                DEFINICOES                                *
%; * * * * *

%; OUTPUTS
#define LED          PORTD,0 %\\
#define FREQ_OUT     PORTD,1 %\\

%; FLAGS
#define LEVEL        FLAGS,0 %\\
#define ENDTIME      FLAGS,1 %\\
#define BADCONTACT   FLAGS,2 %\\
#define HIGHTEMPERATURE  FLAGS,3 %\\

%;DEFINCOES DO LCD
#define E            PORTB,0 %\\

```

```

#define      RS          PORTB,1 %\
#define      DADOS_LCD   PORTB

%; * * * * *
%; *                                     MACROS *
%; * * * * *
%; MACROS TO SWITCH MEMORY BANKS

BANK0  MACRO                                     %;MACRO PARA SELECIONAR BANCO 0
        BCF      STATUS,RP0
        BCF      STATUS,RP1
        ENDM

BANK1  MACRO                                     %;MACRO PARA SELECIONAR BANCO 1
        BSF      STATUS,RP0
        BCF      STATUS,RP1
        ENDM

%; MACRO JPG = 'JUMP IF GREATER'
%; THIS MACRO COMPARES AN 8 BIT REGISTER 'REG' WITH A CONSTANT 'VAL' AND JUMPS
%; TO ADDRES 'ENDER' IF THE TEST IS TRUE.
        JPG MACRO  ENDER, REG, VAL                %;
        MOVF      REG,W
        SUBLW     VAL
        BTFSC     STATUS,C
        GOTO      $+3
        BTFSS     STATUS,Z
        GOTO      ENDER
        ENDM

%; MACRO TOGGLE
%; THIS MACRO TOGGLES THE 'BIT' STATUS OF REGISTER 'REG'
        TOGGLE MACRO  REG, BIT
        BTFSS     REG,BIT                %; BIT IS SET?
        GOTO      $+3                    %; NO. GOTO SET BIT
        BCF       REG,BIT                %; YES. CLEAR BIT
        GOTO      $+2                    %; ... AND THEN ENDS MACRO
        BSF       REG,BIT

```

```

ENDM

%; MACRO UDIV0808L
%; THIS MACRO PERFORMS UNSIGNED DIVISION 8X8

UDIV0808L MACRO

%;      Max Timing: 2+7*12+11 = 97 clks
%;      Min Timing: 2+7*11+10 = 89 clks
%;      PM: 13                      DM: 4

                MOVLW                8
                MOVWF                LOOPCOUNT

LOOPU0808A      RLF                  AARGBO,W
                RLF                  REMBO, F
                MOVF                 BARGBO,W
                SUBWF                REMBO, F
                BTFSC                STATUS,C
                GOTO                 UOK88A
                ADDWF                REMBO, F
                BCF                  STATUS,C
UOK88A          RLF                  AARGBO, F

                DECFSZ                LOOPCOUNT, F
                GOTO                 LOOPU0808A
                ENDM

%; * * * * *
%; *                                RESET    VECTOR                                *
%; * * * * *

ORG      0x00
GOTO     INICIO

%; * * * * *
%; *                                INÍCIO DA INTERRUPÇÃO                                *

```

```

%; * * * * *
ORG      0x04          %; ENDEREÇO INICIAL DA INTERRUPÇÃO
SAVE_WREG
MOVWF    W_TEMP        %; SALVA W EM W_TEMP
SWAPF    STATUS,W
MOVWF    STATUS_TEMP    %; SALVA STATUS EM STATUS_TEMP

BTFSF    INTCON,TOIF    %; É INTERRUPÇÃO DE TMRO?
GOTO     SAI_INT        %; NÃO, SAI SE AÇÃO
                    %; SIM

%; * * * * *
%; *                  TRATAMENTO DA INTERRUPÇÃO DE TMRO *
%; * * * * *
%; ESTA ROTINA IRÁ CONTAR O TEMPO, E QUANDO PASSAR 1 SEGUNDO, A VARIÁVEL
%; "TEMPO" SERÁ DECREMENTADA.
%; 1 SEGUNDO = 64us (PRESCALER) X 125 (TMRO) X 125 (TIME_UP)

BCF       INTCON,TOIF    %; LIMPA FLAG DA INT.
MOVLW     .256-.125
MOVWF     TMRO           %; REINICIA TMRO
DECFSZ    TIME_UP,F      %; DECREMENTA CONTADOR AUXILIAR. ACABOU?
GOTO      SAI_INT        %; NÃO, SAI SEM AÇÃO
                    %; SIM. ACABOU 1 SEGUNDO

TOGGLE    PORTD,0
MOVLW     .125
MOVWF     TIME_UP        %; REINICIALIZA TEMPO AUXILIAR
DECFSZ    SECONDS,F      %; DECREMENT 'SECONDS' AND COMPARE: SECONDS = 0?
GOTO      SAI_INT        %; SIM, ENTÃO NÃO DECREMENTA O TEMPO
BSF       ENDTIME        %; SETA FLAG DE FIM DE CONTAGEM

%; * * * * *
%; *                  FIM DA INTERRUPÇÃO *
%; * * * * *

SAI_INT

```

```

    SWAPF    STATUS_TEMP,W
    MOVWF    STATUS                %; RECUPERA STATUS
    SWAPF    W_TEMP,F
    SWAPF    W_TEMP,W              %; RECUPERA W
    RETFIE      %; RETORNA DA INTERRUPÇÃO

%; * * * * *
    CLRF     PORTA
    CLRF     PORTB
    CLRF     PORTC
    CLRF     PORTD
    CLRF     PORTE

INICIO
    BANK1      %; ALTERA PARA O BANCO 1 DA RAM
    MOVLW     B'00001111'
    MOVWF     TRISA                %; CONFIGURA I/O DO PORTA
    MOVLW     B'00000000'
    MOVWF     TRISB                %; CONFIGURA I/O DO PORTB
    MOVLW     B'00000000'
    MOVWF     TRISC                %; CONFIGURA I/O DO PORTC
    MOVLW     B'00000000'
    MOVWF     TRISD                %; CONFIGURA I/O DO PORTD
    MOVLW     B'00000000'
    MOVWF     TRISE                %; CONFIGURA I/O DO PORTE
    MOVLW     B'00000111'
    MOVWF     CMCON                %; DESLIGA COMPARADORES ANALÓGICOS
    MOVLW     B'00000100'          %;
    MOVWF     ADCON1               %; FCLK=FOSC/8, AN0, AN1 & AN3 CONFIG. COMO ENT. ANALOG.
    MOVLW     B'10000101'
    MOVWF     OPTION_REG           %; PRESCALER 1:64 NO TMRO, PULL-UPS DESABILITADOS.
    MOVLW     B'01100000'
    MOVWF     INTCON               %; HABILITA INTERRUPÇÃO DE PERIFERICOS E DE TMRO
    MOVLW     B'00000000'          %; TODAS AS INTERRUPÇÕES DESABILITADAS
    MOVWF     PIE1                 %;
    MOVLW     B'00000000'
    MOVWF     PIE2                 %;

```

```

    MOVLW    .100
    MOVWF    PR2                %; ESTOURO DO TIMER 2 = 100
    BANK0    %; RETORNA PARA O BANCO 0
    MOVLW    B'00000100'        %; PRESCALER = 1:1, POSTSCALER=1:1, TIMER 2 ON
    MOVWF    T2CON              %;
% ; * * * * *
    CLRF     DADO_RECEBIDO
    CLRF     FLAGS
    BCF      LED
    BCF      FREQ_OUT
    BCF      PORTD,7

% ;ESTA SUB-ROTINA MANTEM TODOS OS PIXELS DO LCD ACESOS POR 3 SEGUNDOS
TESTA_LCD
    CALL     INICIA_LCD          %;CHAMADA SUB-ROTINA
    BCF      ENDTIME
    MOVLW    .1
    MOVWF    SECONDS
    CALL     START_TIMER0
    BTFSS    ENDTIME
    GOTO     $-1
    BCF      INTCON,GIE
    GOTO     PRESENTATION_SCREEN

% ; * * * * *
% ; ESTA SUB-ROTINA INICIALIZA O LCD E ACENDE TODOS OS PIXELS DO LCD

INICIA_LCD
    CALL     INITLCD_4BITS        %;CHAMADA A SUB-ROTINA
    CALL     DELAY_2mSEG          %;CHAMADA A SUB-ROTINA
    MOVLW    H'FF'
    MOVWF    VALOR                %;VALOR RECEBE FFh
    CALL     BUFFER_LCD           %;CHAMADA A SUB-ROTINA
    CALL     ACIONA_LCD_4BITS      %;CHAMADA A SUB-ROTINA
    RETURN    %;RETORNA
% ; * * * * *
% ;ESTA ROTINA INICIALIZA O LCD

```

INITLCD_4BITS

```

BCF E                                %;E=0
BCF RS                              %;RS=0, VIA DE DADOS CONTEM INSTRUCAO
CALL    DELAY_50USEG                %;CHAMADA A SUB-ROTINA (DELAY 50 MICRO s)
MOVLW   H'30'                      %;CONFIGURA LCD:
MOVWF   ESC_LCD                    %;INICIALIZACAO
CALL    POSC_BIT
CALL    PULSE
CALL    DELAY_2mSEG                %;CHAMADA A SUB-ROTINA
CALL    DELAY_2mSEG                %;CHAMADA A SUB-ROTINA
MOVLW   H'30'                      %;CONFIGURA LCD:
MOVWF   ESC_LCD                    %; INICIALIZACAO
CALL    POSC_BIT
CALL    PULSE                      %;CHAMADA A SUB-ROTINA
CALL    DELAY_50USEG
MOVLW   H'30'                      %;CONFIGURA LCD:
MOVWF   ESC_LCD                    %; INICIALIZACAO
CALL    POSC_BIT
CALL    PULSE                      %;CHAMADA A SUB-ROTINA
MOVLW   H'28'
MOVWF   ESC_LCD
CALL    POSC_BIT
CALL    PULSE
MOVLW   H'28'
MOVWF   ESC_LCD
CALL    ENVIA_LCD
MOVLW   H'0F'
MOVWF   ESC_LCD
CALL    ENVIA_LCD
MOVLW   H'06'
MOVWF   ESC_LCD
CALL    ENVIA_LCD
CALL    DELAY_2mSEG
MOVLW   H'01'
MOVWF   ESC_LCD
CALL    ENVIA_LCD
CALL    DELAY_2mSEG

```

```

RETURN

%; * * * * *
%;ESTA SUB-ROTINA PREENCHE O BUFFER(20h-3Fh) DO LCD COM O CONTEUDO DO REGs VALOR.
BUFFER_LCD
    MOVLW    TAMANHO_BUFFER
    MOVWF    COUNT1          %;COUNT1 = 20h
    MOVLW    END_INIC_BUFFER
    MOVWF    FSR             %;FSR APONTA PARA O END. 20h (END. INICIAL DO BUFFER)
    MOVF     VALOR,W         %;W RECEBE VALOR

STORE
    MOVWF    INDF            %;END APONTADO POR FSR RECEBE VALOR
    DECFSZ   COUNT1,F        %;DECREMMENTA COUNT1. COUNT1=0?
    GOTO     INCFSR          %;NAO, DESVIA
    RETURN    %;RETORNA

INCFSR
    INCF     FSR,F           %;INCREMENTA FSR...
    GOTO     STORE          %;... APONTA PARA A PROXIMA POSICAO DO BUFFER
    RETURN    %;

%; * * * * *

PRESENTATION_SCREEN          %; mensagem de apresentacao

%; MSG = | |S|n|O|2| |T|h|i|n| |F|i|l|m| |
%;      | |P|h|o|t|o|d|e|t|e|c|t|o|r| | |

    MOVLW    ' '
    MOVWF    0x20
    MOVLW    'S'
    MOVWF    0x21
    MOVLW    'n'
    MOVWF    0x22
    MOVLW    'O'
    MOVWF    0x23
    MOVLW    '2'

```

```
MOVWF 0x24
MOVLW ' ',
MOVWF 0x25
MOVLW 'T',
MOVWF 0x26
MOVLW 'h',
MOVWF 0x27
MOVLW 'i',
MOVWF 0x28
MOVLW 'n',
MOVWF 0x29
MOVLW ' ',
MOVWF 0x2A
MOVLW 'F',
MOVWF 0x2B
MOVLW 'i',
MOVWF 0x2C
MOVLW 'l',
MOVWF 0x2D
MOVLW 'm',
MOVWF 0x2E
MOVLW ' ',
MOVWF 0x2F

MOVLW ' ',
MOVWF 0x30
MOVLW 'P',
MOVWF 0x31
MOVLW 'h',
MOVWF 0x32
MOVLW 'o',
MOVWF 0x33
MOVLW 't',
MOVWF 0x34
MOVLW 'o',
MOVWF 0x35
MOVLW 'd',
```

```

MOVWF 0x36
MOVLW 'e'
MOVWF 0x37
MOVLW 't'
MOVWF 0x38
MOVLW 'e'
MOVWF 0x39
MOVLW 'c'
MOVWF 0x3A
MOVLW 't'
MOVWF 0x3B
MOVLW 'o'
MOVWF 0x3C
MOVLW 'r'
MOVWF 0x3D
MOVLW ' '
MOVWF 0x3E
MOVLW ' '
MOVWF 0x3F

CALL ACIONA_LCD_4BITS
BCF ENDTIME
MOVLW .2
MOVWF SECONDS
CALL START_TIMER0
BTFSS ENDTIME
GOTO $-1
BCF INTCON,GIE

MAIN
CALL TEMPERATURE_MEASUREMENT
BTFSC BADCONTACT                                %; TESTA MAU CONTATO
GOTO $+2
BTFSC HIGHTEMPERATURE
GOTO $+2
CALL FREQUENCY_MEASUREMENT
CALL LCD_SCREEN

```

```

        GOTO      MAIN

%; * * * * *
TEMPERATURE_MEASUREMENT

SETCHANNEL_1
        MOVLW    B'01001001'           %; SELECIONA CANAL 1
        MOVWF    ADCON0
        CALL     DELAY_20USEG           %; TEMPO DE ESTABILIZACAO DO MUX ANALOGICO
        CALL     READ_ANALOG_CHANNEL
        CALL     AVERAGE_4
        MOVF     OUTPUT_AVGLO,W
        MOVWF    TEMPERATURE           %; VALOR DA TEMPERATURA (8 BITS)
BADCONTACT_TEMPERATURE_ALARM
        SUBLW    .41,W                  %; W=TEMPERATURE-.41
        BTFSC    STATUS,C
        GOTO     DATA_RECONSTRUCTION   %; NAO HA MAU CONTATO DO SENSOR
        BSF      BADCONTACT             %; SETA FLAG DE MAU CONTATO DO SENSOR LM35.
        RETURN

DATA_RECONSTRUCTION           %; RECONSTRUCAO DO SINAL DE TEMPERATURA
        BCF      BADCONTACT
        MOVLW    .52                   %; W= TEMPERATURE-52 = TEMPERATURA EM DECIMAL
        SUBWF    TEMPERATURE,W
        MOVWF    NUMA_L                %; NUMAL = TMPERATURE
        CLRF     NUMA_H
        CALL     CONV_16BIN_DECIMAL
        MOVF     UNID,W
        MOVWF    TEMPERATURE_D1
        MOVF     DEZ,W
        MOVWF    TEMPERATURE_D2
        MOVF     CENT,W
        MOVWF    TEMPERATURE_D3
        CALL     SETPOINT_DETERMINATION %; CHAMA ROTINA PARA DETERMINAR O LIMAR DE DETEÇAO
        RETURN

%; * * * * *
SETPOINT_DETERMINATION        %; ROTINA DE COMPENSAÇAO DA TEMPERATURA

```

```

        CLRF      PORTC
TEMPERATURE_LESS_EQUAL25C
        JPG       TEMPERATURE_LESS_EQUAL30C, TEMPERATURE, T25
        MOVLW     SP_25C
        MOVWF     SETPOINT
        RETURN
TEMPERATURE_LESS_EQUAL30C
        JPG       TEMPERATURE_LESS_EQUAL35C, TEMPERATURE, T30
        MOVLW     SP_30C
        MOVWF     SETPOINT
        RETURN
TEMPERATURE_LESS_EQUAL35C
        JPG       TEMPERATURE_LESS_EQUAL40C, TEMPERATURE, T35
        MOVLW     SP_35C
        MOVWF     SETPOINT
        RETURN
TEMPERATURE_LESS_EQUAL40C
        JPG       TEMPERATURE_LESS_EQUAL45C, TEMPERATURE, T40
        MOVLW     SP_40C
        MOVWF     SETPOINT
        RETURN
TEMPERATURE_LESS_EQUAL45C
        JPG       TEMPERATURE_WARNING, TEMPERATURE, T45
        MOVLW     SP_45C
        MOVWF     SETPOINT
        RETURN
TEMPERATURE_WARNING
        MOVLW     SP_45C           %; SE A TEMPERATURE > 45C USA-SE O SETPOINT DE 45C!
        MOVWF     SETPOINT
        JPG       TEMPERATURE_ALARM, TEMPERATURE, T45
        RETURN
TEMPERATURE_ALARM
        BSF       HIGHTEMPERATURE
        RETURN

%; * * * * *
%; ESTA SUB-ROTINA PRODUZ UM DELAY DE 20 MICRO SEGUNDOS PARA FOSC = 4MHz

```

```

%; FORMULA PARA CALCULAR QUANTIDADE DE INSTRUÇOES EXECUTADAS: T = (COUNT1+1)*3+2
DELAY_20USEG
    MOVLW    .5
    MOVWF    COUNT1                %;COUNT1 = 6

REPEAT
    DECFSZ   COUNT1,F              %;DECREMENTA COUNT1, COUNT1 = 0?
    GOTO     REPEAT                %;NAO, DESVIA
    RETURN   %;SIM, RETORNA

%; * * * * *

READ_ANALOG_CHANNEL                %; ROTINA P/ REALIZAR 4 CONV. AD E CALCULAR A MEDIA

    CALL     START_ADC             %; CONVERSAO 1
SAVE_RESULT1
    MOVF     ADRESH,W
    MOVWF    INPUT_AVG1LO
    CLRF     INPUT_AVG1HI

    CALL     START_ADC             %; CONVERSAO 2
SAVE_RESULT2
    MOVF     ADRESH,W
    MOVWF    INPUT_AVG2LO
    CLRF     INPUT_AVG2HI

    CALL     START_ADC             %; CONVERSAO 3
SAVE_RESULT3
    MOVF     ADRESH,W
    MOVWF    INPUT_AVG3LO
    CLRF     INPUT_AVG3HI

    CALL     START_ADC             %; CONVERSAO 4
SAVE_RESULT4
    MOVF     ADRESH,W
    MOVWF    INPUT_AVG4LO
    CLRF     INPUT_AVG4HI

```

```
%; * * * * *
AVERAGE_4      %; ESTA ROTINA CALCULA A MEDIA DE 4 VALORES DE 16BITS
```

[illegible]

```

SUM3
LOAD_RESULT_SUM1
    MOVF    RESULT_SUM1HI,W
    MOVWF   AARGB1
    MOVF    RESULT_SUM1LO,W
    MOVWF   AARGBO
    CALL    D_add                                %
AVERAGE_CALCULATION                            % DIVIDE O RESULTADO DA SOMA POR 4
    BCF     STATUS,C
    RRF     BARGB1,F
    RRF     BARGBO,F
    BCF     STATUS,C
    RRF     BARGB1,W
    MOVWF   OUTPUT_AVGHI
    RRF     BARGBO,W
    MOVWF   OUTPUT_AVGLO                        % RESULTADO SALVO EM OUTPUT_AVGHI...
    RETURN                                     % ... E OUTPUT_AVGLO
%; * * * * *
FREQUENCY_MEASUREMENT
    BSF     PORTD,7                            % SAIDA PARA SINALIZAR INICIO DA...
    CLRF    PULSE_COUNTER                      % ...EXECUCAO DESTA ROTINA
    SETCHANNEL_0                               % SELECIONA CANAL 0 DO ADC
    MOVLW   B'01000001'
    MOVWF   ADCON0
    CALL    DELAY_20USEG
CONFIG_MEASUREMENT_TIME
    MOVLW   .2
    MOVWF   SECONDS                            % QDE DE SEG. DA ROTINA DE MEDICAO DE FREQ.
    CALL    START_TIMER0
READ_SAMPLE1
    CALL    READ_ANALOG_CHANNEL
    CALL    AVERAGE_4
    MOVF    OUTPUT_AVGLO,W
    MOVWF   X1                                % PRIMEIRA AMOSTRA
DETERMINE_INITIAL_POSITION
    SUBWF   SETPOINT,W                        % W = SETPOINT-X1

```

```

        BTFSC    STATUS,C                % RESULT = NEGATIVO?
        GOTO     INITIAL_LEVEL_LO       % NAO
                                           % SIM
INITIAL_LEVEL_HI                        % PRIMEIRA AMOSTRA ESTA EM NIVEL ALTO
        BSF      LEVEL                  % MARCA FLAG
        BSF      FREQ_OUT
        GOTO     READ_SAMPLE2
INITIAL_LEVEL_LO                        % PRIMEIRA AMOSTRA ESTA EM NIVEL BAIXO
        BCF      LEVEL
        BCF      FREQ_OUT
READ_SAMPLE2
        CALL     READ_ANALOG_CHANNEL
        CALL     AVERAGE_4
        MOVF     OUTPUT_AVGLO,W
        MOVWF    X1                    % AMOSTRA 1
DETERMINE_POSITION
        SUBWF    SETPOINT,W            %; W = SETPOINT-X1
        BTFSC    STATUS,C              %; RESULT = NEGATIVO?
        GOTO     LEVEL_LO              %; NAO -> LO LEVEL
LEVEL_HI                                %; SIM. LEVEL HI
        BTFSC    LEVEL                  %; NIVEL ANTERIOR ERA BAIXO?
        GOTO     TEST_TIME_UP          %; NAO. DESVIA.
        INCF     PULSE_COUNTER,F        %; SIM. INCREMENTA COUNTER E SETA FLAG
        BSF      FREQ_OUT
        BSF      LEVEL
        GOTO     TEST_TIME_UP
LEVEL_LO
        BCF      LEVEL
        BCF      FREQ_OUT
TEST_TIME_UP
        BTFSS    ENDTIME                %; ACABOU TEMPO DE MEDICAO?
        GOTO     READ_SAMPLE2          %; NAO. CONTINUA MEDINDO
        BCF      INTCON,GIE            %; SIM. DESABILITA INTERRUPTCOES
        BCF      ENDTIME
FREQUENCY_CALCULATION                  % CALCULO DA FREQUENCIA
        MOVF     PULSE_COUNTER,W
        MOVWF    AARGBO

```

```

    MOVLW    .2
    MOVWF    BARGBO
    CALL     FXD0808U
    MOVF     AARGBO,W
    MOVWF    NUMA_L
    CLRF     NUMA_H
    CALL     CONV_16BIN_DECIMAL
    MOVF     UNID,W
    MOVWF    FREQ_D1
    MOVF     DEZ,W
    MOVWF    FREQ_D2
    MOVF     CENT,W
    MOVWF    FREQ_D3
    BCF      PORTD,7                %; SINALIZA FIM DA ROTINA
    RETURN                                %; RETURN A ROTINA MAIN

%; * * * * *
START_ADC                                % ROTINA PARA INICIAR CONVERSAO AD
    BANKO
    BSF      ADCON0,2
    BTFSC    ADCON0,2                %; FIM DA CONVERSAO AD?
    GOTO     $-1                    %; NAO, AGUARDA.
    RETURN                                %; SIM, SALVA RESULTADO

START_TIMER0
LIGA_TIMER                                %; ROTINA D
    BCF      INTCON,TOIF            %; LIMPA FLAG DE INT. DE TMRO
    MOVLW    .256-.125
    MOVWF    TMRO                    %; INICIA TMRO CORRETAMENTE
    MOVLW    .125
    MOVWF    TIME_UP                %; INICIA TIME_UP CORRETAMENTE
    BSF      INTCON,GIE            %; LIGA CHAVE GERAL DE INTERRUPTOES
    RETURN

%; * * * * *
%;ESTA SUB-ROTINA CONVERTE UM VALOR BINARIO DE 16 BITS EM DECIMAL (0 - 65535).
%;O VALOR EM BINARIO E FORNECIDO PELO PAR DE REGISTRADORES NUMA_H:NUMA_L
%;NUMA_H - BYTE ALTO

```

```

%;NUMA_L - BYTE BAIXO
%;O VALOR EM DECIMAL E FORNECIDO PELAS VARIÁVEIS:
%;DEZ_MIL - DEZENA DE MILHAR
%;MIL - MILHAR
%;CENT - CENTENA
%;DEZ - DEZENA
%;UNID - UNIDADE
%; * * * * *
CONV_16BIN_DECIMAL
    CLRF    UNID                %;LIMPA UNIDADE
    CLRF    DEZ                %;LIMPA DEZENA
    CLRF    CENT              %;LIMPA CENTENA
    CLRF    MIL               %;LIMPA MILHAR
    CLRF    DEZ_MIL          %;LIMPA DEZENA DE MILHAR
    MOVLW   0x10              %;
    MOVWF   NUMB_L            %;
    MOVLW   0x27              %;
    MOVWF   NUMB_H            %;NUMB_H:NUMB_L = 0x2710 (10000 EM DECIMAL)
BIN16DEC_1
    CALL    MOVE_TEMP          %;TEMP_H:TEMP_L <== NUMA_H:NUMA_L
    CALL    SUB16B             %;CHAMADA A SUB-ROTINA
    BTFSS   STATUS,C           %;RESULTADO DEU NEGATIVO?
    GOTO    BIN16DEC_2         %;SIM, DESVIA
    INCF    DEZ_MIL,F          %;NAO, INCREMENTA REG DEZ_MIL
    GOTO    BIN16DEC_1         %;DESVIA
%;*****
BIN16DEC_2
    CALL    MOVE_A             %;NUMA_H:NUMA_L <== TEMP_H:TEMP_L
    MOVLW   0xE8               %;
    MOVWF   NUMB_L            %;
    MOVLW   0x03               %;
    MOVWF   NUMB_H            %;NUMB_H:NUMB_L = 03E8h (1000 EM DECIMAL)
BIN16DEC_3
    CALL    MOVE_TEMP          %;TEMP_H:TEMP_L <== NUMA_H:NUMA_L
    CALL    SUB16B             %;CHAMADA A SUB-ROTINA
    BTFSS   STATUS,C           %;RESULTADO DEU NEGATIVO?
    GOTO    BIN16DEC_4         %;SIM, DESVIA

```

```

        INCF     MIL,F                %;NAO, INCREMENTA REG DEZ_MIL
        GOTO     BIN16DEC_3          %;DESVIA

%;*****
BIN16DEC_4
        CALL     MOVE_A              %;NUMA_H:NUMA_L <== TEMP_H:TEMP_L
        MOVLW    .100                %;
        MOVWF    NUMB_L              %;
        CLRF     NUMB_H              %;NUMB_H:NUMB_L = .100

BIN16DEC_5
        CALL     MOVE_TEMP           %;TEMP_H:TEMP_L <== NUMA_H:NUMA_L
        CALL     SUB16B              %;CHAMADA A SUB-ROTINA
        BTFSS    STATUS,C            %;RESULTADO DEU NEGATIVO?
        GOTO     BIN16DEC_6          %;SIM, DESVIA
        INCF     CENT,F              %;NAO, INCREMENTA REG CENT
        GOTO     BIN16DEC_5          %;DESVIA

%;*****
BIN16DEC_6
        CALL     MOVE_A              %;NUMA_H:NUMA_L <== TEMP_H:TEMP_L
        MOVLW    .10                %;
        MOVWF    NUMB_L              %;
        CLRF     NUMB_H              %;NUMB_H:NUMB_L = .10

BIN16DEC_7
        CALL     MOVE_TEMP           %;TEMP_H:TEMP_L <== NUMA_H:NUMA_L
        CALL     SUB16B              %;CHAMADA A SUB-ROTINA
        BTFSS    STATUS,C            %;RESULTADO DEU NEGATIVO?
        GOTO     BIN16DEC_8          %;SIM, DESVIA
        INCF     DEZ,F               %;NAO, INCREMENTA REG DEZ
        GOTO     BIN16DEC_7          %;DESVIA

%;*****
BIN16DEC_8
        MOVF     TEMP_L,W            %;
        MOVWF    UNID                %;REG UNID = TEMP_L
        RETURN                        %;RETORNA

%;*****
%;ESTA SUB-ROTINA EFETUA UMA SUBRACAO DE 16 BITS:
%;NUMA_H:NUMA_L = NUMA_H:NUMA_L - NUMB_H:NUMB_L

```

SUB16B

```

    MOVF    NUMB_L,W           %;
    SUBWF   NUMA_L,F           %;NUMA_L = NUMA_L - NUMB_L
    MOVLW   0x01               %;W = 1
    BTFSS   STATUS,C           %;RESULTADO DEU NEGATIVO?
    SUBWF   NUMA_H,F           %;SIM, NUMA_H = NUMA_H -1
    BTFSS   STATUS,C           %;NAO, RESULTADO DEU NEGATIVO?
    GOTO     EMPRESTA          %;SIM, DESVIA
    MOVF    NUMB_H,W           %;NAO, W = NUMB_H
    SUBWF   NUMA_H,F           %;NUMA_H = NUMA_H - NUMB_H
    RETURN                          %;RETORNA

```

EMPRESTA

```

    MOVF    NUMB_H,W           %;
    SUBWF   NUMA_H,F           %;NUMA_H = NUMA_H - NUMB_H
    BCF     STATUS,C           %;APAGA BIT C
    RETURN                          %;RETORNA

```

```

%;*****

```

MOVE_TEMP

```

    MOVF    NUMA_L,W           %;
    MOVWF   TEMP_L             %;
    MOVF    NUMA_H,W           %;
    MOVWF   TEMP_H             %;TEMP_H:TEMP_L <== NUMA_H:NUMA_L
    RETURN                          %;RETORNA

```

```

%;*****

```

MOVE_A

```

    MOVF    TEMP_L,W           %;
    MOVWF   NUMA_L             %;
    MOVF    TEMP_H,W           %;
    MOVWF   NUMA_H             %;NUMA_H:NUMA_L <== TEMP_H:TEMP_L
    RETURN                          %;RETORNA

```

```

%;*****

```

```

%;ESTA SUB-ROTINA CONVERTE O VALOR ARMAZENADO NO REG TEMP_ASC PARA ASCII

```

OBTEM_ASC

```

    MOVWF   TEMP_ASC
    SUBLW   .9                 %;W = 9 - W
    BTFSS   STATUS,C           %;MAIOR QUE 9?
    GOTO     $+4               %;NAO, DESVIA

```

```

        MOVLW    H'30'                %;SIM, W = 30h
        ADDWF    TEMP_ASC,W           %;CONVERTE PARA ASCII
        RETURN                                %;RETORNA
        MOVLW    H'37'                %;W = 37h
        ADDWF    TEMP_ASC,W           %;CONVERTE PARA ASCII
        RETURN                                %;RETORNA
%; * * * * *
LCD_SCREEN
        BTFSC    BADCONTACT
        GOTO     BADCONTACT_SCREEN
        BTFSC    HIGHTEMPERATURE
        GOTO     HIGHTEMPERATURE_SCREEN
        GOTO     FREQUENCY_SCREEN
BADCONTACT_SCREEN
%; DISPLAY THE FOLLOWING SCREEN IF THE SIGNAL FROM TEMPERATURE SENSOR IS MISSING

%; MSG = | | | |T|e|m|p|e|r|a|t|u|r|e| | |
%;      | | |S|e|n|s|o|r| |f|a|i|l|!| | |

        MOVLW    ' '
        MOVWF    0x20
        MOVLW    ' '
        MOVWF    0x21
        MOVLW    ' '
        MOVWF    0x22
        MOVLW    'T'
        MOVWF    0x23
        MOVLW    'e'
        MOVWF    0x24
        MOVLW    'm'
        MOVWF    0x25
        MOVLW    'p'
        MOVWF    0x26
        MOVLW    'e'
        MOVWF    0x27
        MOVLW    'r'
        MOVWF    0x28

```

```
MOVLW    'a'
MOVWF    0x29
MOVLW    't'
MOVWF    0x2A
MOVLW    'u'
MOVWF    0x2B
MOVLW    'r'
MOVWF    0x2C
MOVLW    'e'
MOVWF    0x2D
MOVLW    ' '
MOVWF    0x2E
MOVLW    ' '
MOVWF    0x2F

MOVLW    ' '
MOVWF    0x30
MOVLW    ' '
MOVWF    0x31
MOVLW    'S'
MOVWF    0x32
MOVLW    'e'
MOVWF    0x33
MOVLW    'n'
MOVWF    0x34
MOVLW    's'
MOVWF    0x35
MOVLW    'o'
MOVWF    0x36
MOVLW    'r'
MOVWF    0x37
MOVLW    ' '
MOVWF    0x38
MOVLW    'F'
MOVWF    0x39
MOVLW    'a'
MOVWF    0x3A
```

```

    MOVLW    'i'
    MOVWF    0x3B
    MOVLW    'l'
    MOVWF    0x3C
    MOVLW    '!',
    MOVWF    0x3D
    MOVLW    ' ',
    MOVWF    0x3E
    MOVLW    ' ',
    MOVWF    0x3F

    CALL     ACIONA_LCD_4BITS
    BCF      ENDTIME
    MOVLW    .2
    MOVWF    SECONDS
    CALL     START_TIMER0
    BTFSS    ENDTIME
    GOTO     $-1
    BCF      INTCON,GIE
    RETURN

%; MSG = | | | | | A | l | a | r | m | ! | | | | |
%;      | H | i | g | h | | T | e | m | p | e | r | a | t | u | r | e |

    MOVLW    ' ',
    MOVWF    0x20
    MOVLW    ' ',
    MOVWF    0x21
    MOVLW    ' ',
    MOVWF    0x22
    MOVLW    ' ',
    MOVWF    0x23
    MOVLW    ' ',
    MOVWF    0x24
    MOVLW    'A',
    MOVWF    0x25
    MOVLW    'l',

```

```

MOVWF 0x26
MOVLW 'a'
MOVWF 0x27
MOVLW 'r'
MOVWF 0x28
MOVLW 'm'
MOVWF 0x29
MOVLW '!',
MOVWF 0x2A
MOVLW ', '
MOVWF 0x2B
MOVLW ', '
MOVWF 0x2C
MOVLW ', '
MOVWF 0x2D
MOVLW ', '
MOVWF 0x2E
MOVLW ', '
MOVWF 0x2F

MOVLW 'H'
MOVWF 0x30
MOVLW 'i'
MOVWF 0x31
MOVLW 'g'
MOVWF 0x32
MOVLW 'h'
MOVWF 0x33
MOVLW ', '
MOVWF 0x34
MOVLW 'T'
MOVWF 0x35
MOVLW 'e'
MOVWF 0x36
MOVLW 'm'
MOVWF 0x37
MOVLW 'p'

```

```

MOVWF 0x38
MOVLW 'e'
MOVWF 0x39
MOVLW 'r'
MOVWF 0x3A
MOVLW 'a'
MOVWF 0x3B
MOVLW 't'
MOVWF 0x3C
MOVLW 'u'
MOVWF 0x3D
MOVLW 'r'
MOVWF 0x3E
MOVLW 'e'
MOVWF 0x3F

CALL ACIONA_LCD_4BITS
BCF ENDTIME
MOVLW .2
MOVWF SECONDS
CALL START_TIMER0
BTFSS ENDTIME
GOTO $-1
BCF INTCON,GIE
RETURN

```

FREQUENCY_SCREEN

```

%; MSG = | | | | | F|=|X|X|X|H|z| | | | |
%;      |T|e|m|p|e|r|a|t|u|r|e| |x|x|x|C|

```

```

MOVLW ' '
MOVWF 0x20
MOVLW ' '
MOVWF 0x21
MOVLW ' '
MOVWF 0x22
MOVLW ' '

```

```

MOVWF 0x23
MOVLW ' ',
MOVWF 0x24
MOVLW 'F',
MOVWF 0x25
MOVLW '=',
MOVWF 0x26

MOVF FREQ_D3,W
BTFSC STATUS,Z           %; D3 = 0?
GOTO CLEAR_FREQ_D3       %; SIM
CALL OBTEM_ASC           %; NAO. CHAMADA A SUB-ROTINA
MOVWF 0x27
GOTO END_CLEAR_FREQ_D3

CLEAR_FREQ_D3
MOVLW ' ',
MOVWF 0x27

END_CLEAR_FREQ_D3
MOVF FREQ_D2,W
CALL OBTEM_ASC
MOVWF 0x28
MOVF FREQ_D1,W
CALL OBTEM_ASC
MOVWF 0x29
MOVLW 'H',
MOVWF 0x2A
MOVLW 'Z',
MOVWF 0x2B
MOVLW ' ',
MOVWF 0x2C
MOVLW ' ',
MOVWF 0x2D
MOVLW ' ',
MOVWF 0x2E
MOVLW ' ',
MOVWF 0x2F

```

```

    MOVLW    'T'
    MOVWF    0x30
    MOVLW    'e'
    MOVWF    0x31
    MOVLW    'm'
    MOVWF    0x32
    MOVLW    'p'
    MOVWF    0x33
    MOVLW    'e'
    MOVWF    0x34
    MOVLW    'r'
    MOVWF    0x35
    MOVLW    'a'
    MOVWF    0x36
    MOVLW    't'
    MOVWF    0x37
    MOVLW    'u'
    MOVWF    0x38
    MOVLW    'r'
    MOVWF    0x39
    MOVLW    'e'
    MOVWF    0x3A
    MOVLW    '='
    MOVWF    0x3B
    MOVF     TEMPERATURE_D3,W           ; W
    BTFSC    STATUS,Z                   ; D3 = 0?
    GOTO     CLEAR_TEMP_D3              ; SIM
    CALL     OBTEM_ASC                   ; NAO. CHAMADA A SUB-ROTINA
    MOVWF    0x3C
    GOTO     END_CLEAR_TEMP_D3

CLEAR_TEMP_D3
    MOVLW    ' '
    MOVWF    0x3C
END_CLEAR_TEMP_D3

    MOVF     TEMPERATURE_D2,W           ; W <== B_CENT
    CALL     OBTEM_ASC                   ; CHAMADA A SUB-ROTINA
    MOVWF    0x3D

```

```

    MOVF    TEMPERATURE_D1,W
    CALL    OBTEM_ASC
    MOVWF   0x3E
    MOVLW   'C'
    MOVWF   0x3F

    CALL    ACIONA_LCD_4BITS
    RETURN

%;      8/8 Bit Unsigned Fixed Point Divide 8/8 -> 08.08
%;      Input:  8 bit unsigned fixed point dividend in AARGBO
%;              8 bit unsigned fixed point divisor in BARGBO
%;      Use:    CALL    FXD0808U
%;      Output: 8 bit unsigned fixed point quotient in AARGBO
%;              8 bit unsigned fixed point remainder in REMBO
%;      Result: AARG, REM  <--  AARG / BARG
%;      Max Timing:      1+97+2 = 100 clks
%;      Min Timing:      1+89+2 = 92 clks
%;      PM: 1+13+1 = 15          DM: 4

FXD0808U          CLRF          REMBO

                  UDIV0808L

                  RETLW          0x00

%; * * * * *
%;ESTA SUB-ROTINA ATUALIZA O LCD COM OS VALORES ARMAZENADOS NO BUFFER(20h-3Fh)
% UTILIZANDO 4 LINHAS DE DADOS
ACIONA_LCD_4BITS
    BCF      E                      %;LINHA E = 0
    BCF      RS                     %;LINHA /RS = 0. LCD RECEBE INSTRUCAO
    MOVLW    0x80
    MOVWF    ESC_LCD                %;APONTA PARA 1° POSICAO DA 1° LINHA
    CALL     ENVIA_LCD              %;CHAMADA A SUB-ROTINA
    BSF      RS                     %;RS=1, LCD RECEBE DADO
    MOVLW    END_INIC_BUFFER
    MOVWF    FSR                    %;FSR APONTA PARA O ENDEREÇO INICIAL DO BUFFER

```

OBTEM_CARACTERE

```

    MOVF    INDF,W           %;W RECEBE CONTEUDO DO ENDERECO APONTADO POR FSR
    MOVWF   ESC_LCD         %;ESC_LCD = ENDERECO APONTADO POR FSR
    CALL    ENVIA_LCD        %;CHAMADA A SUB-ROTINA
    MOVLW   END_FIM_LINHA1   %;W =2Fh
    SUBWF   FSR,W            %;W = FSR - 2Fh
    BTFSC   STATUS,Z         %;FINAL DA PRIMEIRA LINHA?
    GOTO     METADE           %;SIM, DESVIA
    MOVLW   END_FIM_LINHA2   %;NAO, W = 3Fh
    SUBWF   FSR,W            %;W = FSR - 3Fh
    BTFSC   STATUS,Z         %;FINAL DA SEGUNDA LINHA?
    GOTO     $+3              %;SIM, SELTA 3 LINHAS PARA BAIXO
    INCF    FSR,F            %;NAO, INCREMENTA FSR
    GOTO     OBTEM_CARACTERE  %;DESVIA
    RETURN                                %;RETORNA

```

METADE

```

    BCF     RS               %;RS=0, LCD RECEBE INSTRUCAO
    MOVLW   0xC0
    MOVWF   ESC_LCD         %;APONTA PARA 1° POSICAO DA 2° LINHA
    CALL    ENVIA_LCD        %;CHAMADA A SUB-ROTINA
    BSF     RS               %;RS=1, LCD RECEBE DADO
    INCF    FSR,F            %;INCREMENTA FSR
    GOTO     OBTEM_CARACTERE  %;DESVIA

```

%;*****

POSC_BIT

```

    MOVLW   B'11110000'     %;W RECEBE F0h
    ANDWF   ESC_LCD,W        %;W = F0h and ESC_LCD
    MOVWF   TEMP_LCD         %;TEMP_LCD = W
    MOVF    DADOS_LCD,W      %;W = DADOS_LCD
    ANDLW   B'00001111'     %;W = 0Fh and DADOS_LCD
    MOVWF   DADOS_LCD        %;DADOS_LCD = W
    MOVF    TEMP_LCD,W       %;W = ESC_LCD
    IORWF   DADOS_LCD,F      %;DADOS_LCD = W ior DADOS_LCD
    RETURN                                %;RETORNA

```

```

%;*****
ENVIA_LCD
    CALL    POSC_BIT          %;CHAMADA A SUB-ROTINA
    CALL    PULSE             %;CHAMADA A SUB-ROTINA
    SWAPF   ESC_LCD,F         %;INVERTE NIBBLES ALTO E BAIXO DE ESC_LCD
    CALL    POSC_BIT          %;CHAMADA A SUB-ROTINA
    CALL    PULSE             %;CHAMADA A SUB-ROTINA
    RETURN                                %;RETORNA

%;*****
%;ESTA SUB-ROTINA PRODUZ UM DELAY DE 50 MICRO SEGUNDOS PARA FOSC = 4MHz
DELAY_50USEG
    MOVLW   .15
    MOVWF   COUNT1_T          %;COUNT1 = 15

REPEAT1
    DECFSZ  COUNT1_T,F        %;DECREMENTA COUNT1, COUNT1 = 0?
    GOTO    REPEAT1           %;NAO, DESVIA
    RETURN                                %;SIM, RETORNA

%;*****
%;ESTA SUB-ROTINA PRODUZ UM DELAY DE 2 MILI SEGUNDOS PARA FOSC = 4MHz
DELAY_2mSEG
    MOVLW   .38
    MOVWF   COUNT1            %;COUNT2 = 38

DELAY
    CALL    DELAY_50USEG      %;CHAMADA A SUB-ROTINA
    DECFSZ  COUNT1,F          %;DECREMENTA COUNT2, COUNT22 = 0?
    GOTO    DELAY             %;NAO, DESVIA
    RETURN                                %;SIM, RETORNA

%;*****
%;ESTA SUB-ROTINA APLICA UM PULSO NA LINHA E DO LCD.
PULSE
    BSF     E                  %;SETA LIMHA E
    NOP                                %;DELAY I MICRO SEGUNDO
    BCF     E                  %;APAGA LINHA E
    CALL    DELAY_50USEG      %;CHAMADA A SUB-ROTINA
    RETURN                                %;RETORNA

```

```

%;*****
%;                               Double Precision Addition & Subtraction
%;
%;*****%;
%;   Addition :  ACCb(16 bits) + ACCa(16 bits) -> ACCb(16 bits)
%;       (a) Load the 1st operand in location AARGBO & AARGb1 ( 16 bits )
%;       (b) Load the 2nd operand in location BARGBO & ACCbHI ( 16 bits )
%;       (c) CALL D_add
%;       (d) The result is in location BARGBO & ACCbHI ( 16 bits )
%;
%;   Performance :
%;       Program Memory   :      07
%;       Clock Cycles    :      08
%;*****%;
%;   Subtraction : ACCb(16 bits) - ACCa(16 bits) -> ACCb(16 bits)
%;       (a) Load the 1st operand in location AARGBO & AARGb1 ( 16 bits )
%;       (b) Load the 2nd operand in location BARGBO & ACCbHI ( 16 bits )
%;       (c) CALL D_sub
%;       (d) The result is in location BARGBO & ACCbHI ( 16 bits )
%;
%;   Performance :
%;       Program Memory   :      14
%;       Clock Cycles    :      17
%;       Program:         DBL_ADD.ASM
%;       Revision Date:
%;               1-13-97      Compatibility with MPASMWIN 1.40
%;
%;*****
%;*****
%;       Double Precision Subtraction ( ACCb - ACCa -> ACCb )
%;
D_sub    call    neg_A          %; At first negate ACCa%; Then add
%;
%;*****
%;       Double Precision Addition ( ACCb + ACCa -> ACCb )
%;

```

D_add

```
    movf    AARGBO,W
    addwf   BARGBO, F      %;add lsb
    btfsc   STATUS,C      %;add in carry
    incf    BARGB1, F
    movf    AARGB1,W
    addwf   BARGB1, F      %;add msb
    retlw   0
```

%;

%;

neg_A

%;*****

END

Bibliografia

- [1] B. X. Huang, P. Tornatore, and Y. S. Li. Ir and raman spectrochemical studies of corrosion films on tin. *Electrochimica Acta*, 46:671, 2001.
- [2] N. Yamazoe and K. Shimano. Theory of power laws for semiconductor gas sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 128:566, 2008.
- [3] figaro.co.jp. Site da figaro engineering inc, 2008. <http://www.figaro.co.jp>.
- [4] Ust-india.com. Site ust-india gmbh, 2008. <http://www.ust-india.com>.
- [5] M. Kamionka, P. Breuil, and C. Pijolat. Calibration of a multivariate gas sensing device for atmospheric pollution measurement. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 118:323, 2006.
- [6] Y. Kato and T. Mukai. A real time intelligent gas sensor system using a nonlinear dynamic response. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 120:514, 2007.
- [7] J. Yang, K. Hidajat, and S. Kawi. Synthesis of nano- SnO_2 /sba-15 composite as a highly sensitive semiconductor oxide gas sensor. *Materials Letters*, 62:1441, 2008.
- [8] L. H. Qian, K. Wang, Y. Li, H. T. Fang, Q. H. Lu, and X. L. Ma. Co sensor based on au-decorated SnO_2 nanobelt. *Materials Chemistry and Physics*, 100:82, 2006.
- [9] C. Cané, I. Gràcia, A. Götz, L. Fonseca, E. Lora-Tamayo, M. C. Horrillo, I. Sayago, J. I. Robla, J. Rodrigo, and J. Gutiérrez. Detection of gases with arrays of micromachined tin oxide gas sensors. *Sensors and actuators B*, 65:44, 2000.
- [10] Q. I. Pan, J. Xu, X. Dong, and J. Zhang. Gas-sensitive properties of nanometer-sized SnO_2 . *Sensors and Actuators B: Chemical*, 66:237–239, 2000.
- [11] L. Xi, D. Qian, X. Tang, and C. Chen. High surface area SnO_2 nanoparticles: Synthesis and gas sensing properties. *Materials Chemistry and Physics*, 108:232, 2008.

- [12] G. X. Wang, J. S. Park, M. S. Park, and X. L. Gou. Synthesis and high gas sensitivity of tin oxide nanotubes. *Sensors and Actuators B*, 131:313, 2008.
- [13] A. Chaiboun, R. Traute, T. Haas, O. Kiesewetter, and T. Doll. A logarithmic multi-parameter model using gas sensor main and cross sensitivities to estimate gas concentrations in a gas mixture for SnO_2 gas sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 123:1064, 2007.
- [14] G. Sanon, R. Rup, and A. Massing. Growth and characterization of tin oxide films prepared by chemical vapour deposition. *Thin Solid Films*, 190:287–301, 1990.
- [15] L. Bruno, C. Pijolat, and R. Lalauze. Tin dioxide thin-film gas sensor prepared by chemical vapour deposition : Influence of grain size and thickness on the electrical properties. *Sensors and Actuators B*, 18:195, 1994.
- [16] F. C. Marques. Sprayed SnO_2 antireflection coating on textured silicon surface for solar cell applications. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 45:1619, 1998.
- [17] Z. M. Jarzebski and J. P. Marton. Physical properties of SnO_2 materials - preparation and defect structure. *Journal of the Electrochemical Society*, 123:199, 1976.
- [18] Z. M. Jarzebski and J. P. Marton. Physical properties of SnO_2 materials - electrical properties. *Journal of the Electrochemical Society*, 123:333, 1976.
- [19] H. L. Hartnegel, A. L. Dawar, A. K. Jain, and C. Jagadish. *Semiconducting Transparent Thin Films*. Taylor & Francis, 1^a edition, 1995.
- [20] C. Cobianu, C. Savaniu, P. Siciliano, S. Capone, M. Utriainen, and L. Niinisto. SnO_2 sol-gel derived thin films for integrated gas sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 77:496–502, 2001.
- [21] V. Baranauskas, T.E.A. Santos, M.A. Schreiner, Z. Jingguo, A.P. Mammana, and C.I. Z. Mammana. Analysis of nanocrystalline coatings of tin oxides on glass by atomic force microscopy. *Sensors and Actuators B*, 85:90, 2002.
- [22] J. G. Zhao. *Caracterização de amostras rugosas por microscopia de força atômica*. PhD thesis, DSIF-FEEC-UNICAMP, Campinas - SP, 2003.
- [23] R. Pallàs-Areny and J. G. Webster. *Sensors and signal conditioning*. John Wiley & Sons, Inc, second edition, 2001.

- [24] M. Fontana, N. Matias, A. C. Barros, and F. F. Costa. Caracterização da fotossensibilidade da resistência elétrica de filmes de dióxido de estanho poroso nanoestruturado utilizando o processo de pulverização química. In *CBECIMAT-2008*, volume 1, pages 1–10, Porto de Galinhas-PE-Brazil, 2008.
- [25] J. Zuo, C. Xu, X. Liu, C. Wang, C. Wang, Y. Hu, and Y. Qian. Study of the raman spectrum of nanometer SnO_2 . *Journal of Applied Physics*, 75:1835, 1994.
- [26] www.sunrom.com. *Datasheet LDR Model510*. Sunrom, 1998.
- [27] Dick Smith Electronics. *Datasheet Cadmium Sulphide Light Dependent Resistor Z-4801*. Dick Smith Electronics, 1999.
- [28] hamamatsu.com. Site da hamamatsu photonics k.k., 2009. <http://www.hamamatsu.com>.
- [29] Vishay Semiconductors. Ambient light sensors replacing photo resistors (cds) with phototransistors, 2007. Application Note 84754. <http://www.vishay.com>.
- [30] Hamamatsu. Characteristics and use of infrared detectors, 2004. Technical Information SD-12. <http://www.hamamatsu.com>.
- [31] photonicosolutions.co.uk. Site da photonic solutions, 2009. <http://www.photonicsolutions.co.uk>.
- [32] sensorsinc.com. Site da sensors inc, 2009. <http://www.sensorsinc.com>.
- [33] J. A. Blackburn. *Modern Instrumentation for Scientists and Engineers*. Springer, 2001.
- [34] K. Ogata. *Engenharia de controle moderno*. Prentice Hall do Brasil Ltda, Rio de Janeiro, Brasil, 1993.
- [35] R.Z. Morawski. Unified approach to measurand reconstruction,. *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 43:226–230, 1994.
- [36] www.microchip.com. *Datasheet PIC16F87X*. Microchip, 2003.
- [37] A. Palacherla. Pic16c5x / pic16cxxx math utility routines, 1997. Application Note DS00526E. <http://www.microchip.com>.

- [38] R. Mancini. Op amps for everyone, August 2002. Design Reference SLOD006B, <http://www.ti.com>.
- [39] W. S. Zanco. *Microcontroladores PIC - Técnicas de Software e Hardware para Projetos de Circuitos Eletrônicos*. 2006.