

---

# Caracterização e modelagem das propriedades ópticas de sensores de dióxido de vanádio

Márcio Fontana

Dissertação de Mestrado submetida à Coordenação dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba - Campus II como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Informação

Antonio Marcus Nogueira Lima, Dr.  
Orientador

---

Campina Grande, Paraíba, Brasil  
©Márcio Fontana, Julho de 2001



F677c Fontana, Marcio  
Caracterizacao e modelagem das propriedades opticas de sensores de dióxido de vanadio / Marcio Fontana. - Campina Grande, 2001.  
94 f.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Eletrica) - Universidade Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e Tecnologia.

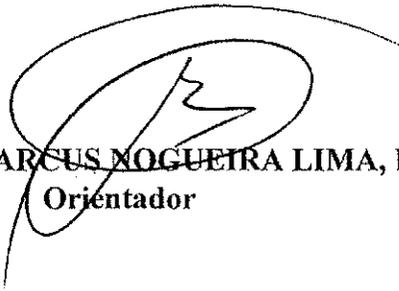
1. Histerese 2. Dióxido de Vanadio 3. Propriedades Opticas 4. Dissertacao - Engenharia Eletrica I. Lima, Antonio Marcus Nogueira II. Universidade Federal da Paraiba - Campina Grande (PB) III. Título

CDU 621.377(043)

CARACTERIZAÇÃO E MODELAGEM DAS PROPRIEDADES ÓPTICAS DE  
SENSORES DE DIÓXIDO DE VANÁDIO

MÁRCIO FONTANA

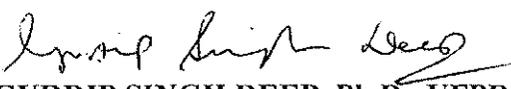
Dissertação Aprovada em 18.07.2001



PROF. ANTONIO MARCUS NOGUEIRA LIMA, Dr., UFPB  
Orientador



PROF. PÉRICLES REZENDE BARROS, Ph.D., UFPB  
Componente da Banca



PROF. GURDIP SINGH DEEP, Ph.D., UFPB  
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB  
Julho - 2001

## Dedicatória

Aos meus pais Mario e Anélia, à minha irmã Simone e à minha querida noiva Camila Alexandrina.

## Agradecimentos

À Deus, por sempre me guiar e proteger durante toda minha vida.

Aos meus pais Mario e Anélia, pelo apoio e incentivo irrestrito durante toda a minha vida.

À minha noiva Camila Alexandrina, pela dedicação, compreensão e incentivo durante todo este trabalho.

À família Viana de Figueirêdo, em especial Antônio e Ana Cleide, pelo apoio e incentivo.

Ao professor Antonio Marcus Nogueira Lima, pela incansável orientação, colaboração e amizade sem as quais não seria possível realizar este trabalho.

Ao professor e amigo Luiz Alberto de Almeida, pela colaboração, auxílio e apoio durante este trabalho.

Aos professores Péricles Rezende Barros, José Sérgio da Rocha Neto e Washington Neves, pela amizade e apoio.

Aos amigos do LIEC e LEIAM, em especial Vicente, Valnyr, Djalma, Adolfo, Claudia, Alexandre, Marcelo, Reginaldo, Edgard, Rômulo, Gustavo, Ivan, Talvanes, Mauricio, Levi, Ricardo, Glaúcio, Flávio, Christian e Netto, pela amizade e bons momentos.

Aos amigos José Claudeni, Lenildo Jr., Charles, Alexandre e Fabiano, pela amizade e convivência diária.

À todos os funcionários da COPELE e do DEE, pelo apoio recebido.

Ao CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, por viabilizar a realização deste trabalho.

À todos os que não constam nesta nota, mas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

## Resumo

Nesse trabalho estuda-se a caracterização e modelagem das propriedades ópticas de sensores de dióxido de vanádio ( $VO_2$ ). Esses sensores sofrem uma transformação cristalográfica induzida por temperatura e exibem o fenômeno de histerese. Para a modelagem das propriedades ópticas no plano de fase foi necessário adaptar o modelo clássico de Preisach e o modelo de aproximação ao limite adiabático. No modelo de Preisach foi necessário redefinir o operador da histerese elementar, escolher uma função de distribuição e adotar uma nova interpretação do triângulo de Preisach. No modelo de aproximação ao limite adiabático foi modificado a função que representa o ciclo de equilíbrio adiabático.

Uma plataforma experimental foi desenvolvida para submeter o filme de  $VO_2$  a uma variação de temperatura controlada e, desse modo, permitir a caracterização de suas propriedades ópticas. As propriedades de remoção e congruência e o fenômeno de acomodação, também, foram testadas experimentalmente. A variação da temperatura da plataforma experimental foi obtida utilizando um módulo Peltier. A linearização em torno de um ponto de operação possibilitou que o módulo Peltier pudesse ser representado por um sistema linear de segunda ordem com os parâmetros dependentes da temperatura. O módulo Peltier foi identificado para nove pontos de operação e um controlador de temperatura do tipo PID escalonado foi projetado utilizando a técnica de cancelamento de pólos e zeros.

A função de distribuição utilizada no modelo de Preisach modificado foi determinada a partir das curvas decrescentes de primeira ordem utilizando um algoritmo genético. A identificação dos parâmetros do modelo de aproximação ao limite adiabático modificado foi obtida diretamente dos valores experimentais do laço principal da histerese característica. Os modelos obtidos experimentalmente foram utilizados para gerar laços de histerese que foram comparados com dados experimentais. Os resultados obtidos são considerados satisfatórios. Entretanto, os modelos desenvolvidos reproduzem apenas de forma aproximada o fenômeno da histerese do filme de  $VO_2$ . As discrepâncias entre a modelagem e os dados experimentais podem ser atribuídas, principalmente para a propriedade de congruência, a limitações na implementação numérica do modelo, ao controle preciso da temperatura do filme e a limitações da plataforma experimental.

# Abstract

In this work the characterization and modelling of the optical properties of a vanadium dioxide sensor ( $VO_2$ ) are studied. These sensors present a crystallographic transformation induced by temperature and exhibit hysteresis. For the modelling of the optical properties in the phase plan it was necessary to adapt the classic Preisach model and the adiabatic limit approximation model. In the Preisach model it was necessary to redefine the elementary hysteresis operator, to choose a distribution function and to adopt a new interpretation of the Preisach triangle. In the adiabatic limit approximation model the expression that represents the adiabatic equilibrium limits was also modified.

An experimental platform was developed to submit the film of  $VO_2$  to a controlled temperature variation in order to allow the characterization of its optical properties. The wiping-out and congruency properties and the accommodation phenomenon were observed experimentally. The temperature was controlled by using a Peltier module. The linearization around an operation point made possible the Peltier module to be represented by a second order linear system with temperature dependent parameters. The model of the Peltier module was identified for nine operating points and a scheduling PID temperature controller was designed by the zero-pole cancellation technique.

The distribution function used in the modified Preisach model was determined from the first-order descending transition curves by using a genetic algorithm. The parameters of the modified adiabatic limit approximation model were obtained directly from the experimental data of the major hysteresis loop. The models obtained experimentally were used to generate hysteresis loops that were compared with the experimental data. The obtained results are considered satisfactory. However, the developed models reproduce approximately the hysteresis phenomenon of the film of  $VO_2$ . The discrepancies between the calculated and the experimental data, mainly for the congruency property, can be attributed to limitations in the numeric implementation of the model, to the film temperature control and the experimental platform limitations.

# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Considerações preliminares . . . . .	1
1.1.1	Objetivos e contribuições . . . . .	1
1.1.2	Sensores . . . . .	2
1.1.3	Histerese . . . . .	3
1.1.4	Motivação do trabalho . . . . .	5
1.2	Conceitos e definições . . . . .	6
1.3	Revisão bibliográfica . . . . .	8
1.3.1	Processo de deposição dos filmes . . . . .	8
1.3.2	Aplicações e modelagem . . . . .	10
1.3.3	Propriedades elétricas . . . . .	12
1.3.4	Propriedades ópticas . . . . .	13
1.3.5	Sensibilidade térmica do filme . . . . .	14
1.4	Sinopse dos capítulos . . . . .	15
<b>2</b>	<b>Modelos de histerese</b>	<b>16</b>
2.1	Introdução . . . . .	16
2.2	Modelo de Preisach . . . . .	16
2.2.1	Concepção do modelo . . . . .	16
2.2.2	Interpretação geométrica . . . . .	18
2.2.3	Propriedades do modelo . . . . .	21
2.2.4	Implementação do modelo de Preisach . . . . .	22
2.3	Modelo de aproximação ao limite adiabático . . . . .	23
2.3.1	Sistemas adiabáticos . . . . .	23
2.3.2	Modelo de aproximação adiabática . . . . .	24
2.3.3	Implementação do modelo de aproximação adiabática . . . . .	27
2.4	Conclusões . . . . .	27

<b>3</b>	<b>Modelagem do Sensor de dióxido de vanádio</b>	<b>29</b>
3.1	Introdução . . . . .	29
3.2	Modelo de Preisach modificado . . . . .	29
3.2.1	Propriedades do modelo de Preisach modificado . . . . .	32
3.2.2	Implementação do modelo de Preisach modificado . . . . .	32
3.3	Modelo de aproximação ao limite adiabático modificado . . . . .	37
3.3.1	Implementação do modelo de aproximação ao limite adiabático modificado . . . . .	39
3.4	Conclusões . . . . .	40
<b>4</b>	<b>Plataforma Experimental</b>	<b>41</b>
4.1	Introdução . . . . .	41
4.2	Estrutura mecânica e óptica . . . . .	41
4.3	Circuitos eletrônicos auxiliares . . . . .	43
4.3.1	Circuito fonte de luz . . . . .	43
4.3.2	Circuito do fotodetector . . . . .	45
4.3.3	Circuito de alimentação do módulo termoeletrico . . . . .	49
4.4	Sistema de aquisição de dados . . . . .	51
4.5	Conclusões . . . . .	53
<b>5</b>	<b>Sistema de controle</b>	<b>54</b>
5.1	Introdução . . . . .	54
5.2	Módulo Peltier . . . . .	54
5.3	Controle de temperatura da plataforma . . . . .	55
5.4	Modelagem do módulo Peltier . . . . .	56
5.5	Projeto do Controlador . . . . .	64
5.6	Conclusões . . . . .	68
<b>6</b>	<b>Resultados experimentais e modelagem do filme</b>	<b>70</b>
6.1	Caracterização óptica do filme . . . . .	70
6.1.1	Transmitância e Refletância . . . . .	70
6.1.2	Sensibilidade Térmica . . . . .	72
6.2	Propriedades do Modelo de Preisach . . . . .	73
6.2.1	Propriedade de remoção . . . . .	73
6.2.2	Propriedade de congruência . . . . .	75
6.3	Fenômeno de acomodação do filme . . . . .	78

6.4	Modelagem das propriedades ópticas . . . . .	81
6.4.1	Modelo de Preisach modificado . . . . .	81
6.4.2	Modelo aproximação ao limite adiabático modificado . . . . .	84
6.5	Conclusões . . . . .	86
<b>7</b>	<b>Conclusões</b>	<b>89</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>91</b>

# Lista de Símbolos e Abreviaturas

$a, a_1, b, b_0, b_1$ e $c$	: coeficientes dos polinômios
$C_h, C_c$ e $C_s$	: capacitâncias térmica: da face quente, da face fria e do dissipador de calor
$CNTP$	: condições normais de temperatura e pressão
$CVD$	: deposição por vapor químico
$E(.)$	: função de Everett
$f(.)$	: função de um sistema qualquer
$f_{\alpha'\beta'}(.)$	: função decrescente de primeira ordem ( $FOD$ )
$f_{an}(.)$	: função <i>anhysteretic</i> de materiais sem histerese
$f_L(.)$	: função do ciclo limite de equilíbrio adiabático
$f_L^{-1}(.)$	: função inversa do ciclo limite de equilíbrio adiabático
$f_s$	: saturação de uma histerese qualquer
$f_a(.)$	: função de aproximação adiabática
$FOD$	: curva decrescente de primeira ordem
$G_s, G_h, G_c$ e $G_m$	: condutâncias térmica: do dissipador de calor para meio ambiente, da face quente para dissipador de calor, da face fria para camada térmica e do módulo Peltier
$G(.)$	: função de transferência do controlador de temperatura
$H(.)$	: intensidade de campo magnético
$h_0$	: parâmetro de ajuste da função do ciclo limite de equilíbrio adiabático
$I$ ou $i(.)$ , $I_o$ e $I_\delta$	: corrente elétrica, corrente constante e pequeno sinal de corrente
$J$	: densidade de corrente elétrica
$K$	: ganho do conversor tensão/corrente
$k$	: condutividade térmica do material
$k_N, \tau_N, \rho_N, k_P,$ $\tau_P$ e $\rho_P$	: valores médios das propriedades do módulo Peltier

$K_G$ e $K_H$	: ganhos: do controlador de temperatura e do módulo Peltier
$L(t)$	: linha de interface do triângulo de Preisach
$MA$	: massa atômica
$M_{an}(\cdot)$	: função <i>anhysteretic</i> da magnetização de materiais magnéticos sem histerese
$M_s$	: magnetização de saturação
$O$	: oxigênio
$o(\cdot), h(\cdot), j(\cdot)$ e $g(\cdot)$	: funções hiperbólicas das curvas FODs
$P$	: transmitância
$p_1, \dots, p_{16}$	: parâmetros das funções hiperbólicas das curvas FODs
$P_0$	: saturação inferior da histerese da transmitância óptica
$P_s$	: saturação da histerese da transmitância óptica
$P_h$ e $P_c$	: potência de calor face quente e face fria
$P_L(\cdot)$	: função do ciclo de equilíbrio adiabático da transmitância óptica
$P_L^{-1}(\cdot)$	: função inversa do ciclo de equilíbrio adiabático da transmitância óptica
$PM$	: processos com metalurgia do pó
$PVD$	: deposição por vapor de pó
$Q$	: refletância
$R$	: resistência elétrica
$R_m$	: resistência elétrica do módulo Peltier
$\tau_{\min}$ e $\tau_{\max}$	: taxa de variação da excitação mínima e máxima
$S$	: irradiação
$S_{in}$	: irradiação incidente
$S_{refl}$	: irradiação refletida
$S_{trans}$	: irradiação transmitida
$S_{+1}, S_{-1}$ e $S_0$	: áreas do triângulo de Preisach
$t$ e $t_f$	: tempo e tempo final
$T, T_1, T_2$ e $T_3$	: temperaturas diversas
$T_c$	: temperatura central da histerese da transmitância óptica
$T_a, T_h, T_c$ e $T_s$	: temperaturas: ambiente, da face quente, da face fria e do dissipador de calor

$TCR, TCP$	$e$	: coeficiente térmico da resistência, coeficiente térmico da transmitância e coeficiente térmico da refletância
$TCQ$		
$T_\alpha$ e $T_\beta$		: limiar de transição do operador elementar modificado
$u(.)$		: excitação qualquer
$u_\alpha$ e $u_\beta$		: eixo de crescimento e decrescimento da excitação
$u_1$ e $u_2$		: entradas de um sistemas de equações
$V$		: vanádio
$VO_2$		: dióxido de vanádio
$V_2O_3$		: trióxido de vanádio
$V_2O_5$		: pentóxido de vanádio
$V_i(.)$ , $V_o(.)$ , $V_{be}$		: tensões: entrada, saída, base-emissor e ânodo-cátodo
$e V_{ak}$		
$x_1$ , $x_2$ e $x_3$		: estados do um sistemas de equações
$\dot{x}_1$ , $\dot{x}_2$ e $\dot{x}_3$		: derivadas dos estados de um sistemas de equações
$Z$		: número atômico
$H_{TE}(.)$		: função de transferência do módulo Peltier
$\alpha$ e $\beta$		: limiares de transição do operador de Preisach
$\Delta T_{ref}(.)$		: variação da temperatura de referência
$\Delta T_c(.)$		: variação da temperatura do controlador
$\Delta u$		: variação de excitação
$\Delta T$		: variação de temperatura
$P_{\alpha'\beta'}(.)$		: curva decrescente de primeira ordem da transmitância óptica
$\mu(.)$		: função de distribuição de Preisach
$\gamma_{\alpha\beta}$		: operador elementar de Preisach
$\delta$		: operador da função ciclo limite adiabático
$\omega$		: largura da histerese de transmitância óptica
$\zeta$		: parâmetro de ajuste da função de aproximação adiabática
$\Omega$		: área limita no triângulo de Preisach
$\tau$		: coeficiente de Thomson
$\rho$		: resistividade elétrica

# Lista de Tabelas

1.1	Características físicas do vanádio . . . . .	9
4.1	Características de operação do fotodetector . . . . .	45
4.2	Especificação dos componentes do circuito conversor tensão/corrente . . . . .	50
5.1	Parâmetros do módulo Peltier . . . . .	60
5.2	Parâmetros do módulo Peltier simplificado . . . . .	64
5.3	Identificação do Módulo Peltier . . . . .	65
6.1	Comportamento das propriedades de transmitância e refletância . . . . .	71
6.2	Comportamento da sensibilidade térmica das propriedades de transmitância e refletância . . . . .	73
6.3	Variação percentual da propriedade de remoção da transmitância e refletância	75
6.4	Variação percentual da propriedade de congruência da transmitância e refletância . . . . .	77
6.5	Variação percentual do fenômeno de acomodação do filme de $VO_2$ (excitação = senoidal) . . . . .	78
6.6	Variação percentual do fenômeno de acomodação do filme de $VO_2$ (excitação = ruído pseudo-aleatório) . . . . .	80

# Lista de Figuras

1.1	Histerese resistência <i>versus</i> temperatura do filme de $VO_2$ . . . . .	12
1.2	Histereses típicas da transmitância e refletância do filme de $VO_2$ . . . . .	13
2.1	Ímãs elementares dos materiais magnéticos . . . . .	17
2.2	Histerese elementar de Preisach . . . . .	17
2.3	Interpretação matemática do modelo de Preisach . . . . .	18
2.4	Triângulo de Preisach. . . . .	19
2.5	Interface $L(t)$ para uma excitação monotonicamente crescente . . . . .	20
2.6	Interface $L(t)$ para uma excitação monotonicamente decrescente . . . . .	21
2.7	Ciclo limite e função <i>anhysteretic</i> do modelo de aproximação ao limite adiabático . . . . .	25
2.8	Reversão da histerese e aproximação ao limite oposto . . . . .	26
3.1	Histereses elementares . . . . .	30
3.2	Triângulo de Preisach modificado. . . . .	31
3.3	Determinação das curvas decrescente de primeira ordem . . . . .	33
3.4	Influência das funções $h(T_\alpha)$ , $o(T_\alpha)$ , $j(T_\alpha)$ e $g(T_\alpha)$ nas curvas decrescente de primeira ordem . . . . .	36
3.5	Ciclo limite da transmitância óptica do filme de $VO_2$ . . . . .	38
3.6	Comportamento da histerese óptica da transmitância e aproximação ao limite oposto . . . . .	39
4.1	Esquema da montagem experimental . . . . .	42
4.2	Vista frontal da plataforma experimental . . . . .	42
4.3	Circuito gerador de luz . . . . .	44
4.4	Corrente no diodo <i>laser</i> . . . . .	44
4.5	Circuito do fotodetector . . . . .	45
4.6	Influência do coeficiente de temperatura: variação cíclica da temperatura entre $20^\circ C - 80^\circ C - 20^\circ C$ . . . . .	46

4.7	Característica do fotodetector no plano de fase tensão <i>versus</i> temperatura.	47
4.8	Modelagem da dependência térmica do fotodetector . . . . .	48
4.9	Circuito conversor tensão/corrente . . . . .	49
4.10	Resposta do conversor tensão/corrente . . . . .	51
4.11	Sistema de aquisição e controle da plataforma experimental . . . . .	52
5.1	Módulo Peltier . . . . .	55
5.2	Diagrama de bloco do controle de temperatura . . . . .	55
5.3	Definição do fluxo de corrente e calor no módulo Peltier . . . . .	56
5.4	Representação do sistema físico e do circuito elétrico equivalente do módulo Peltier . . . . .	58
5.5	Resultado experimental e simulado da temperatura da face fria para um degrau de corrente de 0.1A. . . . .	60
5.6	Circuito elétrico simplificado do módulo Peltier . . . . .	61
5.7	Resultado experimental e simulado da temperatura da face fria do módulo Peltier simplificado para um degrau de corrente de 0.1A. . . . .	63
5.8	Circuito elétrico simplificado dependente da temperatura . . . . .	66
5.9	Resultado obtido na implementação do controlador PID escalonado . . . . .	68
6.1	Verificação experimental das propriedades ópticas do filme de $VO_2$ . . . . .	71
6.2	Sensibilidade das propriedades ópticas do filme de $VO_2$ . . . . .	72
6.3	Temperatura de excitação para a propriedade de remoção . . . . .	74
6.4	Propriedade de remoção do filme de $VO_2$ . . . . .	74
6.5	Temperatura de excitação para a propriedade da congruência . . . . .	76
6.6	Propriedade de congruência do filme de $VO_2$ . . . . .	77
6.7	Fenômeno de acomodação do filme de $VO_2$ (excitação = senoidal) . . . . .	78
6.8	Detalhes do fenômeno de acomodação do filme de $VO_2$ . . . . .	79
6.9	Fenômeno de acomodação do filme de $VO_2$ (excitação = ruído pseudo-aleatório) . . . . .	80
6.10	Temperatura de excitação para gerar a histerese com FODs . . . . .	81
6.11	Verificação experimental das propriedades ópticas do filme de $VO_2$ . . . . .	82
6.12	Superfície das curvas decrescente de primeira ordem . . . . .	83
6.13	Modelagem das propriedades de remoção e congruência do filme de $VO_2$ (Modelo de Preisach) . . . . .	85
6.14	Verificação experimental e modelagem das propriedades ópticas do filme de $VO_2$ . . . . .	86

6.15 Modelagem das propriedades de remoção e congruência do filme de $VO_2$ (Modelo de aproximação ao limite adiabático modificado) . . . . .	87
--	----

# Capítulo 1

## Introdução

Este capítulo introdutório está dividido em quatro tópicos:

- considerações preliminares;
- conceitos e definições;
- revisão bibliográfica;
- 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 constantemente 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.

A revisão bibliográfica abrange as principais linhas de pesquisas desenvolvidas com os filmes de óxidos de vanádio. Dentro da proposta deste trabalho, são revisados os trabalhos mais recentes sobre deposição de filmes, caracterização e modelagem das propriedades dos filmes de óxidos de vanádio.

Uma descrição resumida dos principais temas discutidos nos próximos capítulos, fornecendo uma visão global do conteúdo deste trabalho, é apresentada na sinopse dos capítulos.

### 1.1 Considerações preliminares

#### 1.1.1 Objetivos e contribuições

O objetivo deste trabalho é estudar as propriedades ópticas de sensores de dióxido de vanádio. Dessa forma, pretende-se dar prosseguimento às investigações sobre a caracteriza-

ção de sensores constituídos de filmes finos de dióxido de vanádio ( $VO_2$ ) desenvolvidas no Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle da Universidade Federal da Paraíba.

As principais contribuições deste trabalho são:

- caracterização da dependência térmica das propriedades ópticas de sensores de filme fino de dióxido de vanádio e
- adaptação e implementação do modelo de Presaich e do modelo de aproximação ao limite adiabático para a modelagem da histerese óptica do filme de  $VO_2$ .

Os objetivos específicos para a realização destas contribuições são:

1. estudar o comportamento da transição de fase das propriedades ópticas do sensor de  $VO_2$  induzida pela temperatura;
2. montar uma plataforma experimental para a caracterização das propriedades ópticas do filme de  $VO_2$ , que inclui: a estrutura mecânica e óptica, os circuitos eletrônicos auxiliares e o sistema de aquisição e controle;
3. investigar modelos que permitam descrever o fenômeno da histerese óptica do filme de  $VO_2$ .

### 1.1.2 Sensores

Um sensor é frequentemente definido como um “*dispositivo que recebe e responde a um sinal ou estímulo*”. Os sensores podem ser divididos em dois grupos: sensores naturais e sensores artificiais. Os sensores naturais são os encontrados em organismos vivos, usualmente respondem com sinais elétricos e apresentam características eletroquímicas. Sua natureza física é baseada em transporte de íons. Nos sensores artificiais, a informação é, de modo geral, transmitida e processada de forma elétrica através do transporte de elétrons. Dessa forma, Fraden [24] limita a definição de sensores para estes últimos. Assim, um sensor é definido como um “*dispositivo que recebe um sinal ou estímulo e responde com um sinal elétrico*”. O termo estímulo é utilizado como quantidade, propriedade ou condição que sensibiliza o dispositivo e que pode ser convertida em sinal elétrico.

Os sensores podem, também, ser classificados como sensores passivos e sensores ativos quanto ao tipo de resposta [24].

Os sensores passivos geram um sinal elétrico em resposta a um estímulo externo, onde a energia dos estímulos de entrada são convertidos pelo sensor em energia de saída sem a

necessidade de uma fonte de energia adicional. Os termopares, detectores piroelétricos e os sensores piezoelétricos são exemplos de sensores passivos.

Os sensores ativos requerem uma fonte externa para sua operação, que é denominada *fonte de excitação*. Os sensores ativos, também chamados de sensores *paramétricos*, mudam suas propriedades em resposta a um efeito externo e podem ser convertidas em sinais elétricos. O termistor é um exemplo de sensores ativos ou paramétricos. Esse componente não gera nenhum sinal, no entanto, quando uma corrente elétrica circula através dele, a sua resistência pode ser determinada indiretamente a partir da variação de sua corrente e/ou tensão. Essas variações (representadas em ohms) refletem diretamente uma mudança na temperatura.

Existem diversos tipos de sensores para as mais variadas aplicações. Os sensores mais conhecidos são: posição, nível, temperatura, movimento, velocidade, aceleração, força, pressão, fluxo, umidade, radiação, dentre outros. Os sensores, de modo geral, são disponibilizados no mercado após um processo minucioso de investigação, caracterização e modelagem das propriedades físicas e/ou elétricas dos materiais utilizados na fabricação desses sensores.

### 1.1.3 Histerese

O fenômeno da histerese pode ser definido com um efeito de memória estática independente da taxa de variação da excitação [49]. O físico James Alfred Ewing (1881) utilizou pela primeira vez o conceito de histerese no estudo das propriedades termoelétricas dos metais ferrosos. No entanto, o fenômeno da histerese ocorre em materiais de naturezas diferentes e é encontrado em diversas áreas da ciência. A histerese pode ser verificada na física em ferromagnetismo, supercondutividade, fricção e plasticidade. Na engenharia, a histerese pode ser encontrada na fadiga de materiais, termostatos e semicondutores. Em outras áreas da ciência, tais como química, biologia, economia e psicologia experimental são encontrados exemplos do fenômeno da histerese [4,49]. A seguir são apresentadas algumas manifestações do fenômeno da histerese para as diferentes áreas do conhecimento que caracterizam o efeito de memória estática do fenômeno.

Segundo Bertotti [14], a histerese pode ser considerada a essência do comportamento dos materiais magnéticos. A curva de histerese magnética é a representação mais eficiente das características de magnetização em materiais ferromagnéticos. A partir do ciclo de histerese magnética é possível determinar praticamente todos os parâmetros magnéticos relevantes como: permeabilidade, coercividade, remanência e perdas magnéticas. O ciclo de histerese é utilizado em duas importantes classes de materiais magnéticos: os materiais

para a fabricação de ímãs permanentes e materiais de alta permeabilidade. Os ímãs permanentes são materiais magnetizáveis com a capacidade de gerar campos magnéticos em uma determinada região do espaço. Os materiais de alta permeabilidade são muito utilizados na construção de máquinas elétricas. A principal função desses materiais é criar um meio de maior permeabilidade para os campos magnéticos e dessa forma reduzir o volume final dos dispositivos.

De acordo com Duarte *et al.* [21], a aplicação do conceito de histerese à teoria econômica tratando, especificamente, da política de desemprego remonta ao final da década de 80 sendo a histerese definida, fundamentalmente, em duas acepções: forte e fraca. A histerese forte é o efeito permanente de uma inovação (choque) sobre a taxa de desemprego de equilíbrio. A histerese fraca consiste nos efeitos prolongados (mas transitórios) de variações da taxa de desemprego de curto prazo sobre a taxa de desemprego de equilíbrio. De acordo com Pereira [42], o fenômeno da taxa de desemprego de equilíbrio é habitualmente designada por uma histerese. O interesse pelo estudo deste tipo de fenômeno nasce da incapacidade da teoria da taxa natural de desemprego em explicar a persistência do desemprego e pelo fenômeno da histerese representar o efeito de uma memória estática ao longo dos anos.

Almeida e Costa [20], utilizaram um sistema do tipo massa-mola para exemplificar o fenômeno da histerese em sistemas físicos. A particularidade do modelo é a restrição imposta ao movimento da massa, que deve se deslocar ao longo de um trilho reto sem atrito, fixado a uma distância definida da outra extremidade da mola. Esta restrição geométrica introduz uma não-linearidade da qual decorre o aparecimento do fenômeno da histerese.

Na mecânica, o fenômeno da histerese pode ser encontrado em amortecedores do tipo visco-elástico, também chamado de adaptadores de frequência. Esse é um sistema que utiliza as propriedades elásticas e de histerese de uma borracha especial à base de silicone para substituir os amortecedores hidráulicos tradicionais [2].

Na medicina, uma histerese pode ser encontrada nas propriedades elásticas do pulmão. Os pulmões tendem sempre a retrair e expandir, existem dois fatores que são responsáveis por essas ações: os componentes elásticos do tecido pulmonar e a tensão superficial do líquido que recobre o interior dos alvéolos. Quando o pulmão está cheio de líquido, não há histerese, porque não há tensão superficial, quando a tensão superficial é considerada normal ou aumentada há uma histerese que depende da pressão no aparelho respiratório [11].

O fenômeno da histerese pode ser encontrado quando são associados cenários econômicos e cenários energéticos. Constatou-se, por exemplo, que a trajetória de encurtamento da idade e aumento do consumo dos veículos à gasolina era grande na década de setenta. No

entanto, na segunda metade da década de oitenta, começou a cair o consumo por esse tipo de veículo e prosseguiu o aumento da idade dos veículos que envelheceram devido à redução das vendas. Na década de noventa, recuperam-se as vendas de carro, reduzindo-se a idade média e aumentando o consumo. Nesse ciclo, pode ser observado uma certa histerese que descreve o comportamento do número de carros vendidos ao longo do anos [22].

O forte interesse no fenômeno de histerese, contudo, não é apenas para o desenvolvimento tecnológico. A compreensão dos mecanismos físicos responsáveis pela histerese e o desenvolvimento de ferramentas matemáticas adequadas para descrever o fenômeno, tem atraído a atenção de muitos pesquisadores. Segundo Bertotti [14], a histerese é um exemplo de um problema físico e matemático de intrigante elegância e complexidade desafiadora que, ao mesmo tempo, é fonte de inúmeras explicações para o desenvolvimento de novas tecnologias.

O fenômeno da histerese descreve processos não-lineares que ocorrem em diversas áreas, armazena informações passada como uma memória estática do processo e pode ser explorado para várias aplicações e explicações de fenômenos complexos e do cotidiano.

#### 1.1.4 Motivação do trabalho

Nos últimos anos, o sensor de filme fino de  $VO_2$  tem sido intensamente investigado devido a sua transição de fase metal-semicondutor. Algumas propriedades do sensor de  $VO_2$  são sensíveis a variação de temperatura e exibem uma histerese característica.

Os trabalhos que exploram a caracterização e modelagem da propriedade elétrica dos sensores de filmes finos de  $VO_2$  são relativamente recentes [9, 10]. No entanto, não se encontra na literatura trabalhos que tratam, de forma detalhada, da caracterização e modelagem das propriedades ópticas dos filmes de  $VO_2$ .

Jerominek *et al.* [29], apresentaram as primeiras tentativas de caracterização das propriedades óptica dos filmes de  $VO_2$ . A característica transmitância óptica *versus* temperatura foi caracterizada por uma histerese. No entanto, a qualidade dos dados experimentais não possibilitava qualquer avaliação numérica do fenômeno da histerese. Choi *et al.* [17], mostraram as curvas das propriedades de transmitância *versus* temperatura e refletância *versus* temperatura do filme de  $VO_2$ . Foi verificado que as propriedades ópticas do filme de  $VO_2$  são complementares e que exibem uma histerese. Esses trabalhos constituem a literatura encontrada referente a caracterização das propriedades ópticas. Para a modelagem das propriedades ópticas, verificou-se que não há nenhum trabalho que contempla a representação da histerese óptica. Dessa forma, a falta de informações de uma caracterização precisa e uma modelagem adequada para as propriedades ópticas de transmitância

e refletância dos filmes finos de  $VO_2$  é a grande motivação deste trabalho.

## 1.2 Conceitos e definições

Os conceitos e definições que seguem serão utilizados no desenvolvimento desse trabalho.

- **Efeito Seebeck:** É o aparecimento de uma tensão elétrica quando uma diferença de temperatura é mantida entre os dois lados de um dispositivo termoelétrico [19].
- **Efeito Peltier:** Efeito de aquecimento ou resfriamento observado quando uma corrente elétrica circula através de duas junções diferentes [19].
- **Efeito Thomson:** Efeito de aquecimento ou resfriamento observado em um condutor homogêneo quando uma corrente elétrica circula na direção do gradiente de temperatura [19].
- **Efeito Joule:** Efeito de aquecimento observado quando uma corrente elétrica circula por um condutor [19].
- **Energia:** Capacidade de um sistema que permite realizar trabalho. A energia pode se apresentar de várias formas (calorífica, cinética, elétrica, eletromagnética, mecânica, potencial, química, radiante), transformáveis umas nas outras, e cada uma capaz de provocar fenômenos bem determinados e característicos nos sistemas físicos. Em toda transformação de energia há conservação completa dela, isto é, a energia não pode ser criada, mas apenas transformada (primeiro princípio da termodinâmica).
- **Estrutura cristalográfica:** É um conjunto ou agrupamento de átomos em uma determinada disposição espacial.
- **Histerese:** É um fenômeno que representa o efeito de uma memória estática independente da taxa de variação da excitação [49].
- **Irradiação ( $S$ ):** É a energia que pode ser transmitida de um ponto a outro do espaço sem a presença de meios materiais, propagando-se como uma onda eletromagnética.
- **Irradiação incidente ( $S_{in}$ ):** Uma forma de energia qualquer que incide sobre um meio ou corpo.
- **Irradiação refletida ( $S_{refl}$ ):** É a energia que sofre reflexão ao encontrar um meio ou corpo diferente do meio original.

- **Irradiação transmitida ( $S_{trans}$ ):** É a energia que passa de um meio para outro.
- **Limite coercivo (ou coercitivo):** Excitação necessária para alterar o sentido do fenômeno da histerese em um determinado material.
- **Modelagem matemática:** Área do conhecimento que estuda maneiras de desenvolver e implementar modelos matemáticos de sistemas reais [3].
- **Planta:** Uma *planta* é uma parte de um equipamento, eventualmente, um conjunto de itens de uma máquina que funcionam juntos, com a finalidade de desempenhar uma determinada operação [41].
- **Processo:** Um *processo* é uma operação ou um desenvolvimento natural que evolui e é caracterizado por uma série de mudanças graduais que se sucedem, umas em relação às outras, e conduz a um resultado particular [28].
- **Processo irreversível:** Um processo é *irreversível* quando o sistema e todas as partes de sua vizinhança não conseguem voltar ao estado inicial. Um sistema que passa por um processo irreversível não está impedido de retornar ao seu estado inicial. No entanto, se o sistema retornar ao estado inicial não será possível fazer o mesmo com sua vizinhança.
- **Processo reversível:** Um processo é dito *reversível* se o sistema e todas as partes da sua vizinhança puderem retornar exatamente ao estado inicial.
- **Refletância ( $Q$ ):** É a razão entre a energia refletida e a energia incidente ( $Q = S_{refl}/S_{in}$ ).
- **Sistema:** Um *sistema* é uma combinação de componentes que atuam conjuntamente e realizam um objetivo [41]. Um sistema não está limitado a algo físico. O conceito de sistema pode ser aplicado a fenômenos abstratos e dinâmicos [28].
- **Transmitância ( $P$ ):** É a razão entre a energia transmitida e a energia incidente ( $P = S_{trans}/S_{in}$ ).
- **Valência:** É o número de ligações que um átomo ou um radical pode efetuar com outros átomos ou outros radicais sob forma estável, para constituir uma molécula ou outro radical.

## 1.3 Revisão bibliográfica

Os trabalhos que tratam dos filmes finos de óxidos de vanádio são concentrados em três linhas de pesquisa principais, a saber:

- processos de deposição dos filmes,
- caracterização das propriedades dos filmes e
- modelagem das propriedades físicas e estruturais.

A deposição de filmes em camadas muito finas resulta em sensores com propriedades físicas úteis para várias aplicações. Esses sensores apresentam uma transformação em sua estrutura cristalográfica, que é induzida por temperatura, e que produz mudanças significativas em suas propriedades estruturais, mecânicas, elétricas, ópticas, dentre outras.

Nas próximas seções apresentam-se, de forma detalha, os principais estudos realizados com os filmes de dióxidos de vanádio, as propriedades elétricas e ópticas e o conceito de sensibilidade térmica para o filme  $VO_2$ .

### 1.3.1 Processo de deposição dos filmes

A descoberta de novos materiais é sempre associada a um conjunto de novas perspectivas de aplicações. Essas perspectivas são, de modo geral, relacionadas com a tentativa de superação de algum problema tecnológico. O vanádio ( $V$ ) foi descoberto em 1801 por Manoel Del Rio, pertence a família VB do grupo de metais de transição da tabela periódica e, sob condições normais de temperatura e pressão ( $CNTP$ ) é encontrado no estado sólido. A Tabela 1.1 apresenta as principais características desse elemento químico sob  $CNTP$ . Doravante, será convencionado que a representação de números decimais utilizará a notação numérica americana no lugar da notação numérica brasileira, ou seja, o ponto (.) será utilizado no lugar da vírgula (,) para a representação dos números decimais. Por exemplo, o número 3,1415 será representado por 3.1415. A escolha desta notação numérica é devido a utilização de gráficos do *software* MatLab que utiliza a notação numérica americana. Dessa forma, evita-se qualquer erro de interpretação e padroniza-se a notação numérica utilizada nesta dissertação.

O vanádio é um elemento químico com valência variável sendo capaz de formar diferentes tipos de óxidos. O dióxido de vanádio ( $VO_2$ ), o trióxido de vanádio ( $V_2O_3$ ) e o pentóxido de vanádio ( $V_2O_5$ ) são os óxidos de vanádio mais conhecidos e investigados. Os óxidos de vanádios apresentam uma transformação cristalográfica induzida por temperatura. Essa

Propriedades	Valores	unidades
Número atômico ( $Z$ )	23	—
Massa atômica ( $MA$ )	50.942	$u$
Densidade	6.11	$g/cm^3$
Condutividade térmica	31.0	$Wm^{-1}K^{-1}$
Resistividade elétrica	$20 \cdot 10^{-8}$	$\Omega m$
Energia de ionização	649.6	$kJmol^{-1}$
Ponto de fusão	1900	$^{\circ}C$
Ponto de ebulição	3380	$^{\circ}C$
Raio atômico	135	$pm$
Eletronegatividade	1.63	—
Distribuição eletrônica	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^3$	

Tabela 1.1: Características físicas do vanádio

transformação é acompanhada por uma transição de fase entre semicondutor e metal com mudanças significativas em suas propriedades elétricas e ópticas [10,29].

Em 1959, Morin observou pela primeira vez uma transição de fase no dióxido de vanádio [39]. Desde então, esse material tem sido intensamente estudado. Várias propriedades estruturais e físicas estão sendo investigadas. Além disso, vários modelos têm sido utilizados para explicar o mecanismo da transição de fases. Goodenough em 1971, propôs a primeira descrição teórica do fenômeno de transição de fase metal-semicondutor aplicando as teorias de órbita molecular [18]. Lu *et al.* [34], discutiram o mecanismo de transição de fase baseado na teoria de coordenadas de campos.

Os métodos desenvolvidos para a deposição de filmes finos de óxido de vanádio dependem do tipo de substrato. As principais técnicas de deposição de filmes são: deposição por feixe de íons, feixe de elétrons, deposição por vapor químico (*CVD*), evaporação a vácuo, deposição por *laser* pulsado, processos do tipo *sol-gel*, processos com metalurgia do pó (*PM*), decomposição reativa e deposição por evaporação de solução [34,48].

Os processos de deposição de filmes de  $VO_2$  mais conhecidos são: deposição por vapor químico (*CVD*), deposição por processos do tipo *sol-gel* e deposição por vapor de pó (*PVD*). No entanto, os filmes que são construídos utilizando esses processos apresentam laços de histereses maiores que os comparados com os de cristais únicos. Com o intuito de superar esta dificuldade, Béteille *et al.* [15] estudaram o papel do tratamento térmico nas

microestruturas e a forma da histerese dos filmes finos de  $VO_2$  depositados por alcóxidos. Nagashima e Wana [40], discutiram as propriedades ópticas e elétricas do filme de  $VO_2$  preparados sob várias condições, utilizando um processo de deposição por separação a *laser*. Lu *et al.* [34], estudaram os filmes finos de  $VO_2$  preparados por processos do tipo *sol-gel* seguidos por um tratamento de calor sobre vácuo.

A deposição dos filmes de óxido de vanádio utilizando o bombardeamento de íons durante a sua produção, tem se mostrado uma das mais eficientes ferramentas para a modulação das propriedades do filme de  $VO_2$ . Trabalhos recentes têm mostrado que o ângulo de incidência pode ser utilizado em conjunto com o fluxo de íons e energia para produzir filmes com propriedades diferenciadas [31]. A deposição de filmes utilizando o processo do tipo *sol-gel* é considerado um dos melhores métodos de deposição para os filmes de óxido de vanádio em substrato de vidro devido às vantagens de alta pureza, homogeneidade e fácil deposição [34].

A evolução e as melhorias das inúmeras técnicas de deposição tornaram o processo de fabricação de filmes de  $VO_2$  mais confiável e preciso. No entanto, as melhorias no processo de deposição não eliminaram a transição de fase do  $VO_2$ . A característica de transição de fase é intrínseca ao dióxido de vanádio e, de modo geral, independe do processo de deposição.

### 1.3.2 Aplicações e modelagem

O dióxido de vanádio é um material propício para a fabricação de dispositivos elétricos e ópticos, incluindo chaves elétricas, sensores de temperatura, relés térmicos, chaves ópticas, dispositivos de armazenamento ópticos, espelhos de refletividade variável [29], janelas de alta eficiência de energia [34].

Segundo Gruzdeva *et al.* [25], os sensores de filme fino de  $VO_2$  têm sido empregados na construção de bolômetros que operam na região semicondutora, com ponto de operação em torno de  $25^\circ C$ , utilizando algum tipo de dispositivo de resfriamento. Entretanto, estes filmes também podem ser utilizados como bolômetros na sua região de transição de fase, explorando seu alto coeficiente de variação da resistência com a temperatura e eliminando a necessidade de resfriamento externo e dispositivo de controle de temperatura [9]. Zerov *et al.* [51], verificaram que a dependência da resposta de um sinal óptico no bolômetro construído com filmes de  $VO_2$  seguem a dependência da propriedade elétrica para uma ampla faixa de temperatura, inclusive para a região de transição.

No início da década de 90, a Honeywell, empresa americana, fabricou um detector bolométrico de infravermelho na forma de uma matriz utilizando o filme de  $VO_2$ . Esse

detector submetido a testes, utilizando 30 quadros por segundo, foi capaz de detectar um ruído equivalente a uma diferença de temperatura de  $0.1^{\circ}\text{C}$  [29].

O pentóxido de vanádio tem sido utilizado em uma variedade de aplicações científicas e tecnológicas. Um particular interesse foi dedicado para o estudo das propriedades ópticas nas regiões da luz visível e infravermelho. As principais aplicações são como catalisador, cátodo para baterias de estado sólido, janela para células solares, dispositivos eletroquímicos, chaves eletrônicas e ópticas [12]. Esse óxido exibe um eletrocromismo multicolorido que é, particularmente, utilizado em dispositivos ópticos como visores eletrocromáticos, filtros coloridos e janelas inteligentes. Uma outra proposta é a utilização do  $\text{V}_2\text{O}_5$  na fabricação de detectores de radiação [29].

O trióxido de vanádio é um óxido dimorfo, ou seja, é um óxido que apresenta duas formações cristalográfica dependendo da temperatura. O  $\text{V}_2\text{O}_3$  é um óxido de grande interesse teórico e prático em diversas áreas da Engenharia de Materiais. Devido a sua semelhança com as propriedades do  $\text{V}_2\text{O}_5$ , esse óxido tem sido utilizado como catalisador para reações de oxidação [16].

Os trabalhos que tratam da caracterização e modelagem da propriedade elétrica dos sensores de filmes finos de  $\text{VO}_2$  são relativamente recentes. Essa propriedade apresenta no plano de fase, resistência *versus* temperatura, a forma de uma histerese. Almeida *et al.* [9, 10], apresentaram uma adaptação do modelo clássico de Preisach para descrever a histerese resistência *versus* temperatura dos sensores de radiação construídos com filmes finos de  $\text{VO}_2$ . O modelo proposto foi validado para o laço principal e para os laços menores obtidos experimentalmente. Um outro modelo, denominado modelo de aproximação ao limite adiabático, foi desenvolvido para descrever a histerese para a transição de fase metal-semicondutor do  $\text{VO}_2$  [7]. Esse modelo foi utilizado para gerar as características funcionais da transição da histerese de bolômetros construídos com dióxido de vanádio.

Os óxidos de vanádio têm sido investigados pela comunidade científica. No entanto, as propriedades físicas e estruturais, os processos de deposição e a modelagem do filme não foram totalmente explorados. Botto *et al.* [16], afirmaram que há pouca a informação disponível na literatura técnica sobre o comportamento do espectro de vibração do  $\text{VO}_2$  e  $\text{V}_2\text{O}_3$ . Lu *et al.* [34], afirmaram que as propriedades superficiais do filme de  $\text{VO}_2$  preparadas por processos do tipo *sol-gel* têm sido pouco pesquisada. Choi *et al.* [17], afirmaram que a evolução da dinâmica da decomposição spinodal e do crescimento dos domínios das propriedades físicas que exibem a histerese térmica, não tem sido estudado em detalhes para o  $\text{VO}_2$ . Dessa forma, verifica-se que há muito o que explorar e investigar nos filmes de óxidos de vanádio. A caracterização e modelagem das propriedades ópticas do filme de

dióxido de vanádio foi realizada utilizando uma amostra do filme de  $VO_2$  de dimensões de  $3 \times 3 \text{ mm}$  e  $1000 \text{ \AA}$  de espessura depositado sobre um substrato de safira. Esse trabalho é uma etapa importante e significativa para viabilizar sua aplicação.

### 1.3.3 Propriedades elétricas

Dentre as propriedades elétricas dos filmes finos de  $VO_2$ , a propriedade da resistência elétrica tem despertado muito interesse para a construção de sensores. A caracterização da resistência elétrica dos filmes de  $VO_2$  é uma contribuição relativamente recente. Almeida *et al.* [9,10], obtiveram a curva experimental da histerese característica resistência *versus* temperatura do  $VO_2$  a partir da variação cíclica da temperatura do filme entre  $20^\circ\text{C} - 80^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}$ , ver a Figura 1.1.

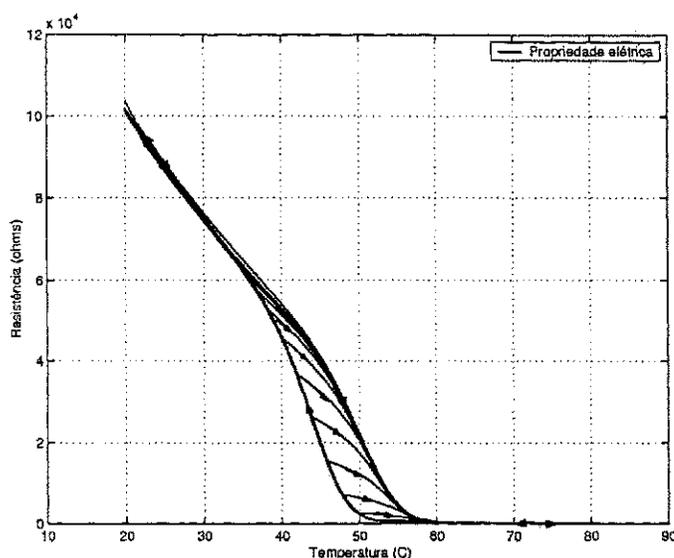


Figura 1.1: Histerese resistência *versus* temperatura do filme de  $VO_2$

É observado que o sensor exibe uma característica de histerese e que, em baixas temperaturas ( $< 30^\circ\text{C}$ ), ele se comporta como um semicondutor, enquanto que, em altas temperaturas ( $> 60^\circ\text{C}$ ), ele se comporta como um metal. Durante a transição de fase entre semicondutor e metal, que ocorre em torno de  $50^\circ\text{C}$ , a estrutura cristalográfica do  $VO_2$  muda de monoclinica para tetragonal e a resistividade pode variar em até 5 ordens de grandeza, dependendo da qualidade da deposição e também dos materiais utilizados como substrato [29].

### 1.3.4 Propriedades ópticas

As propriedades ópticas de transmitância ( $P$ ) e refletância ( $Q$ ) dos sensores de  $VO_2$ , de forma similar às propriedades elétricas, apresentam uma dependência com a temperatura [17]. As figuras 1.2(a) e 1.2(b) ilustram as histereses típicas da transmitância e refletância, respectivamente. Os eixos verticais em  $pu$  (por unidade) representam as grandezas de transmitância e refletância óptica.

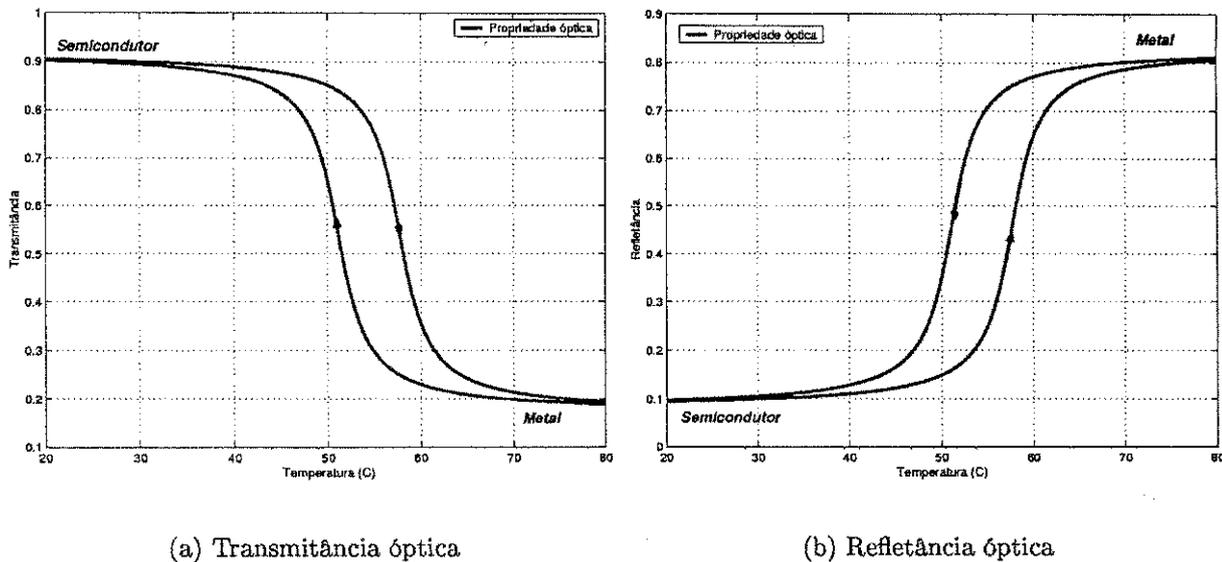


Figura 1.2: Histereses típicas da transmitância e refletância do filme de  $VO_2$

A transmitância é definida como a razão entre a intensidade de luz transmitida e a intensidade de luz incidente e a refletância como a razão entre a intensidade de luz refletida e a intensidade de luz incidente. Considerando que a absorção do filme é muito pequena e pode ser desprezada, as propriedades de transmitância e refletância são consideradas complementares, ou seja, toda luz que não é transmitida pelo filme está sendo refletida e toda luz que não é refletida pelo filme está sendo transmitida.

Para as baixas temperaturas o sensor apresenta uma característica de semicondutor, a transmitância é máxima e a refletância é mínima. Para as altas temperaturas, ocorre o contrário, o sensor apresenta uma característica de metal, a transmitância é mínima e a refletância é máxima [17]. Essa característica também foi observada por Jerominek *et al.* [29], para a faixa de energia entre 0.6 a 0.7eV, por Béteille *et al.* [15] e Christmann *et al.* [18], na região do infravermelho.

Admitindo-se que as propriedades ópticas do filme de  $VO_2$  são complementares; que a

luz incidente no filme é normalizada e que a transmitância do filme é medida, a refletância do filme pode ser calculada como:

$$Q = 1 - P \quad (1.1)$$

ou considerando que a refletância é medida, a transmitância pode ser calculada como:

$$P = 1 - Q \quad (1.2)$$

Neste trabalho, na caracterização das propriedades ópticas do filme de  $VO_2$ , utilizou-se a opção de medir a transmitância óptica e utilizar a equação (1.1) para calcular a refletância.

### 1.3.5 Sensibilidade térmica do filme

A sensibilidade térmica ou coeficiente térmico é um parâmetro muito importante para definir a influência e o grau de dependência de uma grandeza com relação a temperatura. Segundo Jerominek *et al.* [29], o coeficiente térmico da resistência ( $TCR$ ) é um parâmetro “chave” para a caracterização de materiais que são utilizados como detectores bolométricos. O coeficiente térmico da resistência é definido por:

$$TCR = \frac{1}{R} \left( \frac{dR}{dT} \right) \quad (1.3)$$

onde  $R$  é a resistência e  $T$  é a temperatura.

As propriedades de transmitância e refletância óptica são sensíveis à variação de temperatura, ver seção 1.3.4. Dessa forma, dois coeficientes térmicos podem ser definidos: o coeficiente térmico da transmitância ( $TCP$ ) e o coeficiente térmico da refletância ( $TCQ$ ). Assim, tem-se:

$$TCP = \frac{1}{P} \left( \frac{dP}{dT} \right) \quad \text{e} \quad TCQ = \frac{1}{Q} \left( \frac{dQ}{dT} \right) \quad (1.4)$$

onde  $P$  é a transmitância,  $Q$  é a refletância e  $T$  é a temperatura.

O cálculo da sensibilidade térmica da transmitância e da refletância permite a detecção das regiões interesse para o desenvolvimento de futuras aplicações que explorem as propriedades ópticas do filme de  $VO_2$ .

## 1.4 Sinopse dos capítulos

O desenvolvimento desta dissertação está dividido em sete 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 e faz uma revisão bibliográfica abrangente sobre os sensores de filmes finos de  $VO_2$ .

No capítulo 2 aborda-se dois modelos utilizados para representar histereses: o modelo clássico de Preisach e o modelo de aproximação ao limite adiabático. Esses modelos são apresentados como ferramentas para a modelagem de histereses simétricas e centradas na origem.

No capítulo 3 apresenta-se a modelagem da propriedade óptica de transmitância do filme fino de  $VO_2$  a partir de adaptações do modelo de Preisach e do modelo de aproximação ao limite adiabático.

No capítulo 4 descreve-se os componentes que formam a plataforma experimental. É apresentado o esquema da montagem da plataforma de caracterização das propriedades ópticas, os circuitos eletrônicos auxiliares e o sistema de aquisição de dados.

No capítulo 5 trata-se o sistema de controle da plataforma experimental. Um módulo termoeletrônico é utilizado para controlar a temperatura. Esse módulo apresenta características não-lineares que impedem o uso de controladores tradicionais. A modelagem e simulação do módulo, a estratégia de controle e os resultados obtidos para o controle de temperatura são apresentados neste capítulo.

No capítulo 6 apresenta-se os resultados experimentais obtidos através das medições realizadas na plataforma experimental e da modelagem da histerese óptica do filme de  $VO_2$ . Dentre os resultados experimentais, destacam-se a caracterização do ciclo limite da histerese óptica do filme de  $VO_2$  e as propriedades de remoção, congruência e acomodação. A modelagem do filme é implementada utilizando as adaptações do modelo de Preisach e do modelo de aproximação ao limite adiabático.

No capítulo 7 apresenta-se as discussões finais e resume-se as principais conclusões e contribuições obtidas a partir dos resultados alcançados pela investigação. Neste capítulo é sugerido algumas investigações futuras que dariam prosseguimento às investigações dos sensores de filme fino de  $VO_2$ .

# Capítulo 2

## Modelos de histerese

### 2.1 Introdução

Existem vários modelos físicos e matemáticos utilizados para descrever os fenômenos da histerese. Os modelos de histerese mais conhecidos foram derivados da modelagem da histerese magnética. A modelagem de histerese tem seu marco inicial no ano de 1935 com o físico alemão F. Preisach [43], que propôs um modelo escalar para a histerese magnética. Esse modelo se tornou referência no estudo de fenômenos que exibem histereses [30, 36, 37]. Outros modelos foram desenvolvidos e merecem destaque: o modelo de Jiles que propõe um modelo fenomenológico para histerese ferromagnética partindo de considerações termodinâmicas; o modelo de Salih e Lowther que foi desenvolvido para a histerese magnética utilizando redes neurais [8] e o modelo de aproximação ao limite adiabático para a representação da histerese de materiais magnéticos [6].

Nas próximas seções apresentam-se o modelo clássico de Preisach [35] e o modelo de aproximação ao limite adiabático [6] generalizados para histereses simétricas e centradas na origem.

### 2.2 Modelo de Preisach

#### 2.2.1 Concepção do modelo

O modelo de Preisach é baseado em algumas hipóteses sobre mecanismo de magnetização em materiais magnéticos [35]. Na interpretação de Preisach, os materiais magnéticos são constituídos de uma quantidade infinita de ímãs elementares, ver Figura 2.1. Esses ímãs elementares são orientados a partir de um campo externo e permanecem com uma orientação

residual mesmo quando o campo externo é retirado.

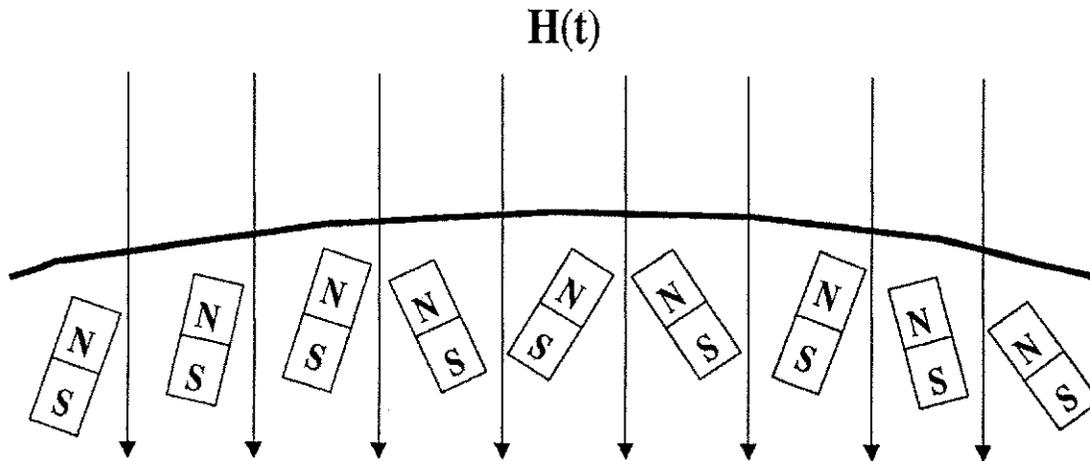


Figura 2.1: Ímãs elementares dos materiais magnéticos

Em 1970, o matemático russo M. Krasnoselskii introduziu uma formulação puramente matemática para representar o modelo de Preisach. Nessa formulação, cada ímã elementar apresenta uma histerese que é representada por um operador  $\gamma_{\alpha\beta}$  onde  $\alpha$  e  $\beta$  correspondem aos limiares de transição superior e inferior da histerese elementar, respectivamente [35]. A Figura 2.2 ilustra a histerese elementar de Preisach.

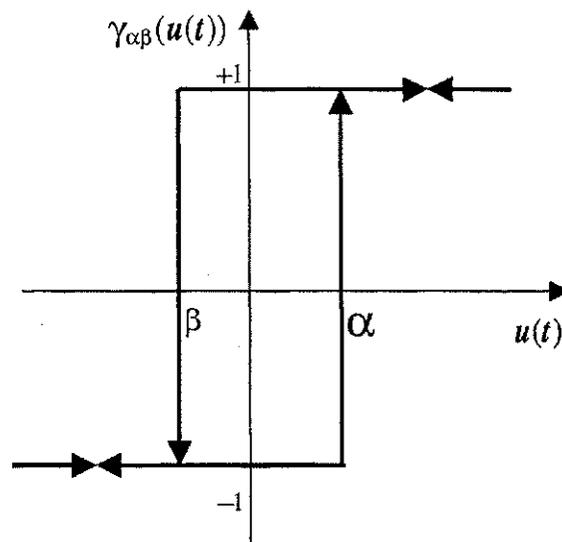


Figura 2.2: Histerese elementar de Preisach

O operador elementar de Preisach é um elemento biestável: quando o valor da excitação

$u(t)$  é maior que o limiar  $\alpha$  o operador assume o valor  $\gamma_{\alpha\beta}(u(t)) = +1$ ; quando o valor da excitação  $u(t)$  é menor que o limiar  $\beta$  o operador assume o valor  $\gamma_{\alpha\beta}(u(t)) = -1$ . Para um valor de excitação  $\beta < u(t) < \alpha$ , o estado do operador depende da história do sinal de excitação.

Pode-se associar a cada operador elementar uma probabilidade de estar no estado  $+1$  ou  $-1$ . O fenômeno macroscópico de histerese pode então ser interpretado em termos estatísticos, para o qual é definida um certa função de distribuição  $\mu(\alpha, \beta)$ , conhecida na literatura por *função de Preisach*. Desse modo, a histerese pode ser representada pela soma de um conjunto de operadores elementares  $\gamma_{\alpha\beta}$  ponderados pela função de distribuição  $\mu(\alpha, \beta)$ , como ilustrado na Figura 2.3.

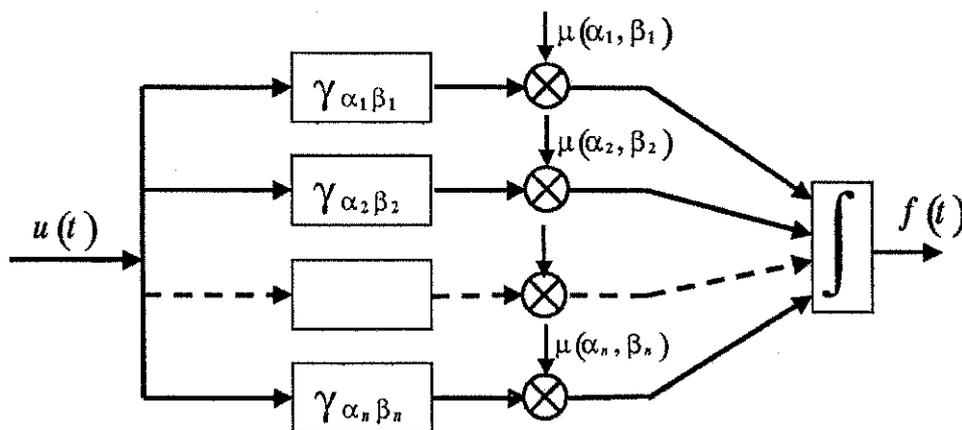


Figura 2.3: Interpretação matemática do modelo de Preisach

Considerando um número infinito de operadores elementares na Figura 2.3, a representação matemática do modelo de Preisach para descrever o fenômeno da histerese é dada por:

$$f(t) = \iint_{\alpha \leq \beta} \gamma_{\alpha\beta}(u(t)) \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \quad (2.1)$$

Pela sua generalidade matemática, o modelo de Preisach é utilizado, na medida que a sua interpretação seja aplicável, como uma ferramenta para estudar as características de histerese apresentados por diversos materiais.

### 2.2.2 Interpretação geométrica

A Figura 2.4 mostra uma interpretação geométrica da equação (2.1) em termos do denominado *triângulo de Preisach*. O eixo de diminuição da excitação é representado por  $u_\beta$  e o

eixo de elevação da excitação é representado por  $u_\alpha$ .

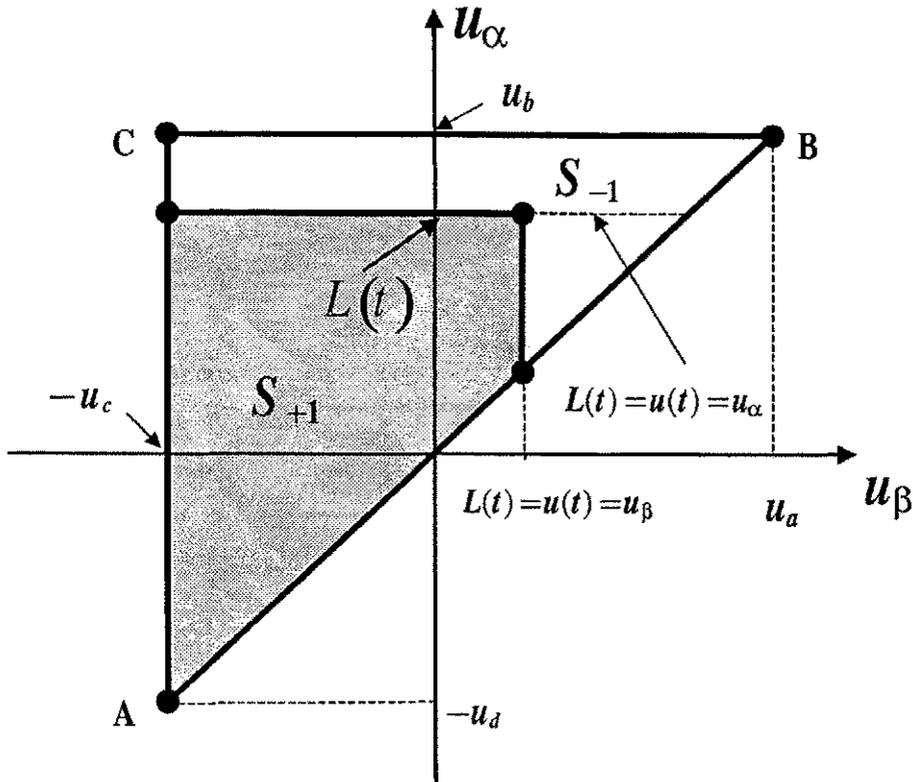


Figura 2.4: Triângulo de Preisach.

Geometricamente, o triângulo de Preisach pode ser dividido em duas áreas,  $S_{+1}$  e  $S_{-1}$  que representam as contribuições das parcelas da equação (2.1) quando os operadores elementares estão nos estados  $+1$  e  $-1$ , respectivamente. Uma linha de interface  $L(t)$  define uma subdivisão nas áreas  $S_{+1}$  e  $S_{-1}$  que depende da história da excitação. Os valores de reversão da taxa de variação da excitação são sempre os vértices que definem a linha de interface  $L(t)$ .

A histerese definida em termos do triângulo de Preisach é dada por:

$$f(t) = \iint_{ABC} \gamma_{\alpha\beta}(u(t)) \mu(u_\alpha, u_\beta) du_\alpha du_\beta \quad (2.2)$$

ou

$$f(t) = \iint_{s_{+1}} \mu(u_\alpha, u_\beta) du_\alpha du_\beta - \iint_{s_{-1}} \mu(u_\alpha, u_\beta) du_\alpha du_\beta \quad (2.3)$$

a equação (2.3) apresenta duas parcelas que representam as contribuições das áreas  $S_{+1}$  e  $S_{-1}$ . A primeira parcela representa a contribuição dos operadores elementares que estão no estado +1 onde  $\gamma_{\alpha\beta}(u(t)) = +1$  e; a segunda parcela representa a contribuição dos operadores elementares que estão no estado -1 onde  $\gamma_{\alpha\beta}(u(t)) = -1$ .

A Figura 2.5 ilustra a interface  $L(t)$  para uma excitação monotonicamente crescente.

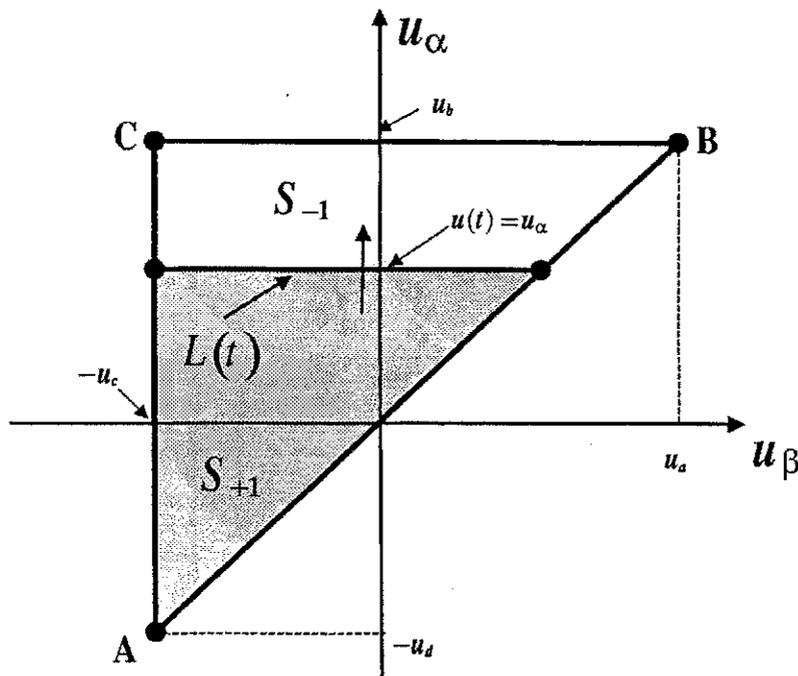


Figura 2.5: Interface  $L(t)$  para uma excitação monotonicamente crescente

O número de operadores elementares no estado +1 aumenta, conseqüentemente, a área  $S_{+1}$  aumenta enquanto a área  $S_{-1}$  diminui. Na Figura 2.5, a excitação monotonicamente crescente é representada por um deslocamento para cima de uma reta horizontal que divide o triângulo nas duas áreas. A reta é definida como  $L(t) = u(t) = u_{\alpha}$ .

Para uma excitação monotonicamente decrescente a interface  $L(t)$  é ilustrada pela Figura 2.6.

Neste caso, o número de operadores elementares no estado -1 aumenta, conseqüentemente, a área  $S_{-1}$  aumenta enquanto a área  $S_{+1}$  diminui. Na Figura 2.6, a excitação monotonicamente decrescente é representada por um deslocamento para esquerda de uma reta vertical que divide o triângulo nas duas áreas. A reta é definida como  $L(t) = u(t) = u_{\beta}$ .

Supondo-se uma excitação monotonicamente crescente seguida de uma reversão na taxa de variação da excitação também de forma monotônica, a interface  $L(t)$ , ilustrada na Figura 2.4, é o resultado gerado por este tipo de excitação. Inicialmente, a excitação

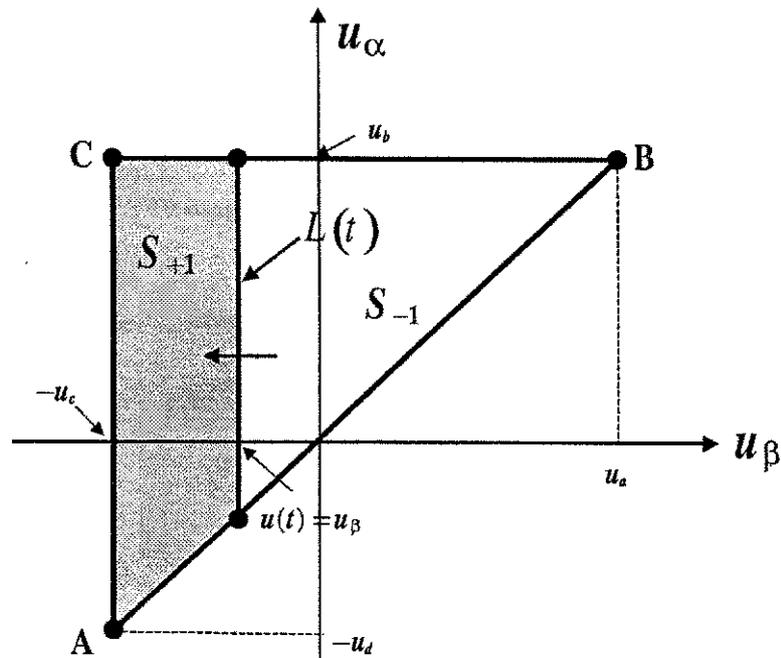


Figura 2.6: Interface  $L(t)$  para uma excitação monotomicamente decrescente

crecente é representada com um deslocamento para cima de uma reta horizontal, e tem-se  $L(t) = u(t) = u_\alpha$ . Quando ocorre a reversão, a excitação é, agora, representada com um deslocamento para esquerda de uma reta vertical, e  $L(t)$  é redefinida como  $L(t) = u(t) = u_\beta$ .

### 2.2.3 Propriedades do modelo

As propriedades de remoção (*wiping-out property*) e congruência (*congruency property*) definem o teorema da representação [35]. Esse teorema especifica que as propriedades de remoção e congruência são as condições necessária e suficiente para que uma determinada característica de histerese possa ser representada pelo modelo de Preisach, quando a excitação é monotônica por partes. Essas propriedades podem ser definidas como:

- Propriedade de Remoção [35]: “Cada valor mínimo da excitação  $u(t)$  remove os vértices da linha  $L(t)$  cujos valores representados no eixo de diminuição da excitação ( $u_\beta$ ) são maiores que esse mínimo e cada valor máximo de  $u(t)$  remove os vértices de  $L(t)$  cujos valores representados no eixo de elevação da excitação ( $u_\alpha$ ) são menores que esse máximo.”
- Propriedade da congruência [35]: “Todos os laços menores de histereses do plano de

fase, centrados numa mesma excitação  $u_0$ , deslocados verticalmente e que resultaram de uma mesma variação de excitação  $\Delta u$  são congruentes.”

### 2.2.4 Implementação do modelo de Preisach

Para a implementação numérica do modelo de Preisach é necessário conhecer ou identificar a função de distribuição de Preisach. Quando a função de distribuição é conhecida, o modelo de Preisach pode ser implementado utilizando os algoritmos conhecidos na literatura [47]. No entanto, quando a função de Preisach é desconhecida deve-se utilizar um método de identificação dos parâmetros da função de distribuição para, posteriormente, implementar o modelo de Preisach.

Mayergoyz [35], desenvolveu um procedimento de identificação dos parâmetros da função de distribuição  $\mu(u_\alpha, u_\beta)$  utilizando os dados experimentais. Esses dados são obtidos traçando-se as curvas decrescente de primeira ordem (FODs - *first-order descending curves*). Estas curvas são utilizadas para definir uma superfície, da qual se obtém a função de distribuição da seguinte forma:

$$\mu(u_\alpha, u_\beta) = \frac{\partial^2 f_{\alpha'\beta'}(u_\alpha, u_\beta)}{\partial u_\alpha \partial u_\beta} \quad (2.4)$$

Uma vez definida a função de distribuição, o modelo de Preisach pode ser implementado utilizando diferentes métodos numéricos. Os algoritmos mais conhecidos para a implementação do modelo de Preisach são: o método clássico de Preisach, o método das integrais de Everett, o método da equação diferencial e o método do modelo móvel [47].

De acordo com Vajda e Della Torre [47], a implementação numérica do método clássico de Preisach apresenta um alto custo computacional. Se a função de distribuição de Preisach é simétrica o custo computacional é minimizado. No entanto, o método clássico de Preisach devido a implementação da integral dupla é sempre associado a um maior custo computacional comparados aos outros métodos.

O método das integrais de Everett utiliza a interpolação do valor da função para um trecho qualquer de interesse. O uso do método da integral de Everett não funciona, adequadamente, quando a excitação apresentar mínimos ou máximos locais no intervalo de interesse, pois a descontinuidade provoca problemas na interpolação dos dados [47].

Segundo Vajda e Della Torre [47], o método da equação diferencial e o método do modelo móvel são os métodos que apresentam os menores custos computacionais e que eliminaram os problemas de excitações com mínimos ou máximos locais.

De modo geral, a implementação do modelo de Preisach está sempre vinculada a solução de alguma integração numérica. Dessa forma, novos modelos estão sendo desenvolvidos para serem utilizados como opção na representação do fenômeno da histerese. A seção 2.3 apresenta um novo modelo que não utiliza equações integrais-diferenciais para descrever o fenômeno da histerese.

## 2.3 Modelo de aproximação ao limite adiabático

### 2.3.1 Sistemas adiabáticos

O modelo de aproximação ao limite adiabático foi desenvolvido para descrever o processo de magnetização em materiais magnéticos. O modelo proposto é baseado na noção de sistemas dinâmicos adiabáticos [6, 8]. O modelo de aproximação ao limite adiabático utiliza o conceito de distância potencial ao ciclo assintótico, ou seja, o laço principal é considerado como ciclo limite que exerce um tipo de campo potencial que atrai as trajetórias da histerese [6]. Sob a ótica de sistemas dinâmicos, qualquer modelo com este comportamento é considerado um sistema adiabático.

Um determinado sistema pode ser considerado um *sistema rápido* quando seu tempo característico é bem menor do que um outro sistema considerado um *sistema lento*. Existem duas situações de interesse particular quando são acoplados sistemas rápidos e lentos [8, 13]:

1. Quando a evolução do sistema lento é imposta pela excitação externa que atua no sistema rápido como se estivesse variando lentamente um parâmetro do sistema rápido. Essa característica permite que o sistema seja descrito sem a utilização de uma equação diferencial. Este tipo de sistema acoplado é denominado de *sistema adiabático*. Para uma certa faixa da taxa de variação da excitação com o tempo,  $r_{\min} < \frac{du}{dt} < r_{\max}$ , o sistema adiabático pode ser considerado independente da taxa.
2. Quando o sistema lento está sendo influenciado e influencia o sistema rápido, devido seus tempos característicos serem semelhantes. Esse tipo de sistema é denominado de *sistema lento-rápido*. Para taxas de variação da excitação  $\frac{du}{dt} > r_{\max}$ , o sistema lento-rápido pode ser considerado dependente da taxa.

Nos sistemas adiabáticos, o sistema rápido após o equilíbrio, tem suas trajetórias confinadas e limitadas pela trajetória do sistema lento. Se este equilíbrio estático perde a estabilidade é obtido o fenômeno denominado bifurcação [6, 8].

Quando um sistema adiabático é excitado com uma função periódica sem a presença de bifurcação, a trajetória no plano de fase segue a curva de equilíbrio independentemente da excitação. No entanto, quando um sistema adiabático é excitado com uma função que apresenta bifurcação, a trajetória no plano de fase segue diferentes curvas de equilíbrio dependendo do tipo de excitação. Essas bifurcações são conhecidas como histereses e o caminho resultante para o equilíbrio adiabático depende do valor atual da excitação e dos valores passados, ou seja, da história da excitação [13].

### 2.3.2 Modelo de aproximação adiabática

Almeida *et al.* [6,8], desenvolveram o modelo de aproximação adiabática para representar o fenômeno da histerese magnética, ou seja, uma histerese simétrica e centrada na origem do plano de fase. No entanto, o modelo de aproximação adiabática pode ser generalizado para qualquer fenômeno que apresentar uma histerese característica semelhante a magnética.

Admitindo que a magnetização em materiais magnéticos sem histerese (*anhysteretic*) possa ser representada pela equação (2.5),

$$M_{an}(H(t)) = \frac{2}{\pi} M_s \arctan\left(\frac{H(t)}{h_0}\right) \quad (2.5)$$

onde  $M_s$  é a magnetização de saturação,  $H(t)$  a intensidade de campo magnético e  $h_0$  um parâmetro de ajuste da curva. A equação (2.5) pode ser generalizada para qualquer material como mostra a equação (2.6),

$$f_{an}(u(t)) = \frac{2}{\pi} f_s \arctan\left(\frac{u(t)}{h_0}\right) \quad (2.6)$$

onde  $f_s$  é a saturação da histerese e  $u(t)$  a excitação.

Um ciclo limite de equilíbrio adiabático foi proposto por Almeida *et al.* [6], esse ciclo parte da suposição que a curva de histerese de interesse possui largura  $\omega$  e que as trajetórias seguem assintoticamente a equação (2.6). Dessa forma, a equação (2.7) é definida como o *ciclo limite de equilíbrio adiabático* para uma histerese simétrica centrada na origem

$$f_L(u(t), \delta) = \frac{2}{\pi} f_s \arctan\left(\frac{u(t) - \delta \frac{\omega}{2}}{h_0}\right) \quad (2.7)$$

onde o operador  $\delta$  é definido por

$$\delta = \begin{cases} +1 & \text{se } \frac{du}{dt} > 0 \\ -1 & \text{se } \frac{du}{dt} < 0 \end{cases} \quad (2.8)$$

A Figura 2.7 ilustra a função *anhysteretic* e o ciclo de equilíbrio adiabático para uma histerese simétrica e centrada na origem.

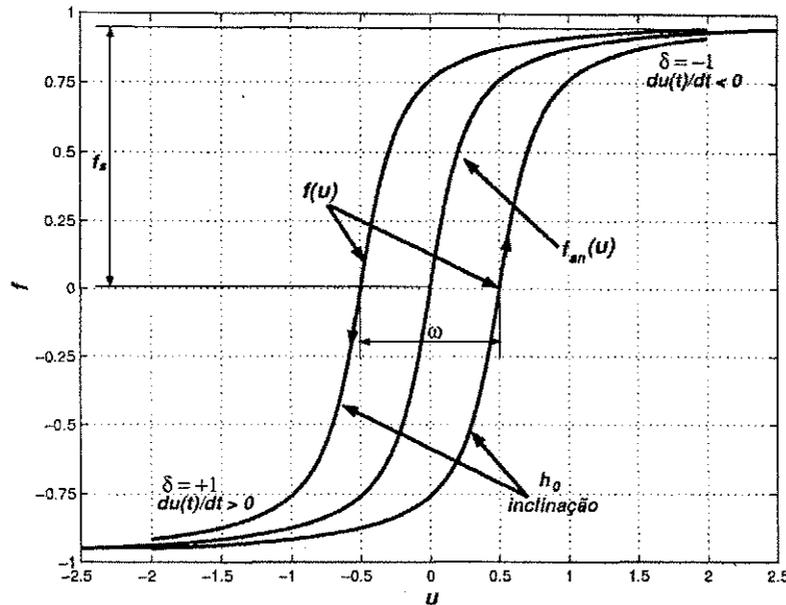


Figura 2.7: Ciclo limite e função *anhysteretic* do modelo de aproximação ao limite adiabático

O ciclo limite pode ser ajustado para representar uma determinada histerese simétrica e centrada na origem a partir dos parâmetros  $\omega$ ,  $f_s$  e  $h_0$ . Os parâmetros  $\omega$ ,  $f_s$  e  $h_0$  representam o limite coercivo, a saturação da histerese e a inclinação da histerese, respectivamente.

A Figura 2.8 ilustra a trajetória de uma histerese que deixa um trecho  $(k - 1)$  e passa para um novo trecho  $(k)$  através de um ponto de reversão  $[f(t_f, k - 1), u(t_f, k - 1)]$ , sendo  $t_f$  o instante final no trecho  $(k - 1)$ .

É observado que para o trecho  $(k)$  a aproximação da trajetória da histerese pode ser calculada pela diferença entre a excitação  $u(t)$  e o valor limite da excitação  $u_L = f_L^{-1}(f, \delta(k))$ , para isto é necessário conhecer a função inversa de  $f_L(u(t), \delta)$ . A função inversa da equação (2.7) pode ser obtida analiticamente, e é dada por:

$$f_L^{-1}(u(t), \delta) = h_0 \tan\left(\frac{\pi f_L(u(t), \delta)}{2f_s}\right) + \delta \frac{\omega}{2} \quad (2.9)$$

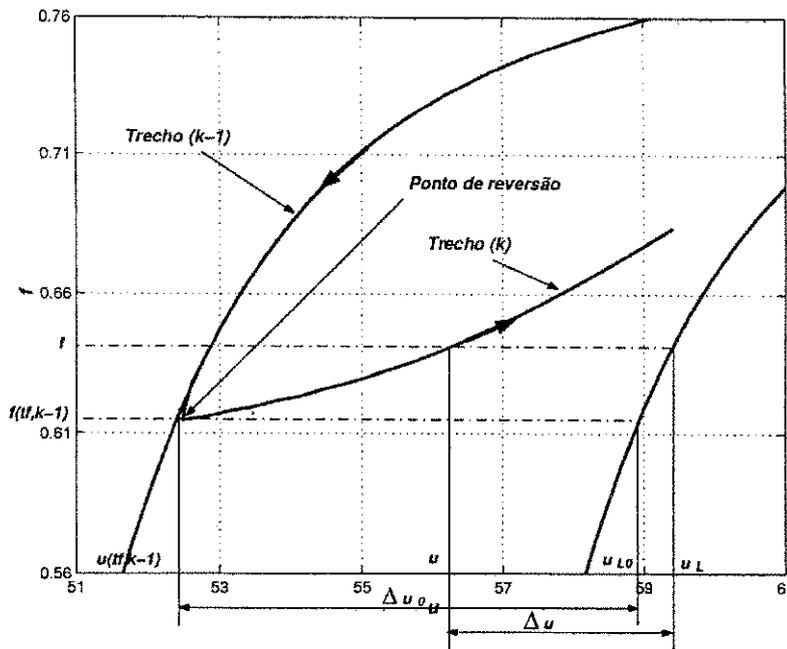


Figura 2.8: Reversão da histerese e aproximação ao limite oposto

A obtenção da função inversa depende, exclusivamente, da função que define o ciclo limite adiabático. De modo geral, pode-se considerar que cada histerese requer um ciclo limite adiabático específico. Em alguns casos, pode ocorrer que a função inversa do ciclo limite adiabático não apresenta uma solução analítica. Nesses casos, a função inversa do ciclo limite adiabático pode ser obtida numericamente a partir uma interpolação inversa.

A principal hipótese do modelo proposto está relacionada com a evolução da diferença  $u_L(t) - u(t)$ , a partir de um ponto de reversão qualquer, essa diferença sempre obedece a uma função decrescente do tipo:

$$f_a(u(t)) = g(u(t), u(t_f, k-1), \Delta u_0) \quad (2.10)$$

denominada de *função de aproximação adiabática*, sendo  $\Delta u_0 = u_{L0} - u(t_f, k-1)$  a diferença inicial [6, 8].

Considerando que  $\Delta u_0(k) = f_L^{-1}[f(t_f, k-1), \delta(k)] - u(t_f, k-1)$ , de acordo com Almeida *et al.* [6, 8], a equação (2.11) é definida para representar a função de aproximação adiabática dada por:

$$f_a(u(t)) = \left\{ \begin{array}{l} \Delta u_0 \left[ 1 - \sin \zeta \left( \frac{u(t) - u_0(t)}{\Delta u_0} \right) \right] \\ 0 \end{array} \right. , \left. \begin{array}{l} \zeta \left( \frac{u(t) - u_0(t)}{\Delta u_0} \right) < \frac{\pi}{2} \\ \zeta \left( \frac{u(t) - u_0(t)}{\Delta u_0} \right) > \frac{\pi}{2} \end{array} \right\} \quad (2.11)$$

Supondo que seja utilizada uma excitação  $u(t)$  variante no tempo, a qual apresenta reversões na taxa de variação da excitação nos instantes  $t_k$  quando  $\frac{d^2 u(t_k)}{dt^2} = 0$ . A excitação  $u(t)$  é então composta de vários trechos monotônicos, sendo que cada trecho ( $k$ ) é iniciado com o último valor de  $f$  e  $u$  do ciclo anterior. Considerando que  $f_L[u(t), \delta(k)] = u(t) + f_a(u(t))$ , o fenômeno da histerese pode ser descrito como

$$f(t, k) = f_L\{u(t) + g[u(t), u(t_f, k-1), \Delta u_0], \delta(k)\} \quad (2.12)$$

sendo  $k = 1, 2, \dots, n$ . Os valores de  $u(t_f, k-1)$  e  $f(t_f, k-1)$  são constantes durante todo o trecho ( $k$ ). O valor de  $\delta$  deve ser atualizado no início de cada trecho, uma vez que nesses instantes ocorrem mudanças no sinal da taxa de variação da excitação.

### 2.3.3 Implementação do modelo de aproximação adiabática

Uma vez definida a função de aproximação adiabática, o problema de modelagem de uma histerese simétrica centrada na origem se resume na obtenção de quatro parâmetros ( $f_s, h_0, \omega$  e  $\zeta$ ). Os parâmetros  $f_s$  e  $\omega$  são obtidos diretamente dos valores do laço principal da histerese característica e os parâmetros  $h_0$  e  $\zeta$  são determinados para ajustar o modelo aos dados experimentais.

A função de aproximação adiabática (Eq. 2.10) é muito importante nesse modelo. Essa função determina a forma com que a trajetória atual se aproxima do limite oposto. A função algébrica recursiva (Eq. 2.12) e sua evolução num trecho ( $k$ ) monotônico qualquer depende apenas do valor inicial  $[f_0(k), u_0(k)]$ . Deve-se notar que a recursividade não está diretamente relacionada ao tempo, mas aos valores finais de  $f(t_f, k-1)$  e  $u(t_f, k-1)$  nos instantes de reversão [6, 8].

Segundo Almeida *et al.* [6, 8], o mecanismo de memória do modelo está relacionado aos pontos de reversão, o conjunto dos valores passados de  $[f_0(k), u_0(k)]$  retêm a memória relativa à história da excitação  $u(t)$ . Para conhecer o estado no plano  $f$  x  $u$  em um trecho qualquer ( $k$ ) é necessário apenas calcular todos os pontos  $[f_0(k), u_0(k)]$  partindo de  $k = 1$  e então calcular o ponto  $t$  de interesse naquele trecho.

## 2.4 Conclusões

Os modelos de histerese devem descrever completamente o fenômeno da histerese de interesse. O modelo de Preisach e o modelo de aproximação ao limite adiabático foram

gereneralizados para representar qualquer fenômeno que apresentar como característica uma histerese simétrica e centrada na origem.

O modelo de Preisach é o precursor na modelagem de histereses. O estudo e análise desse modelo é indispensável para trabalhos que tratam da modelagem de fenômenos com histerese devido a sua importância histórica e sua generalidade matemática.

O modelo de aproximação ao limite adiabático possibilita a modelagem do fenômeno de uma histerese a partir da abordagem de sistemas adiabático. Esse modelo dispensa a solução de equações integrais ou diferenciais. A solução do modelo de aproximação a limite adiabático consiste na implementação de uma equação algébrica recursiva.

A complexidade computacional do modelo de Preisach depende do método utilizado na implementação do modelo. De modo geral, a implementação do modelo de Preisach apresenta uma alta complexidade computacional comparada ao modelo de aproximação ao limite adiabático e dependendo do método escolhido outros cuidados devem ser considerados para obter o sucesso da implementação.

O modelo de Preisach e o modelo de Aproximação ao limite adiabático serão modificados no capítulo 3 para descrever a histerese óptica do filme fino de  $VO_2$ .

## Capítulo 3

# Modelagem do Sensor de dióxido de vanádio

### 3.1 Introdução

A modelagem óptica do sensor de  $VO_2$  deve permitir uma descrição completa da característica da histerese óptica do filme. Recentemente, o modelo de Preisach [9, 10] e o modelo de aproximação ao limite adiabático [5] foram adaptados para caracterizar as propriedades elétricas dos filmes de  $VO_2$ .

Inúmeros estudos estão sendo desenvolvidos para obter modelos que descrevam, da melhor forma possível, a histerese característica resistência *versus* temperatura dos filmes de dióxido de vanádio [4, 10]. Uma questão adicional, que é extremamente importante e que tem um grau de dificuldade considerável, é a determinação dos parâmetros destes modelos. Na maioria dos casos, o procedimento de determinação dos parâmetros tem que ser desenvolvido de forma particular atendendo às necessidades de cada modelo.

Nas próximas seções apresentam-se, de forma detalhada, as adaptações do modelo de Preisach [23] e do modelo de aproximação ao limite adiabático para a modelagem das propriedades ópticas dos filmes de  $VO_2$ .

### 3.2 Modelo de Preisach modificado

A histerese característica da resistência elétrica, bem com as histereses das propriedades ópticas, dos filmes de  $VO_2$  não são centradas na origem. Para superar parcialmente esse problema, foi proposto por Almeida *et al.* [10] uma modificação no operador e uma outra interpretação geométrica foi definida para o modelo de Preisach correspondente. Fontana

*et al.* [23], implementam a modelagem das propriedades ópticas do filme de  $VO_2$  utilizando o modelo de Preisach modificado.

As figuras 3.1(a) e 3.1(b) ilustram a histerese elementar de Preisach e a histerese elementar modificada, respectivamente.

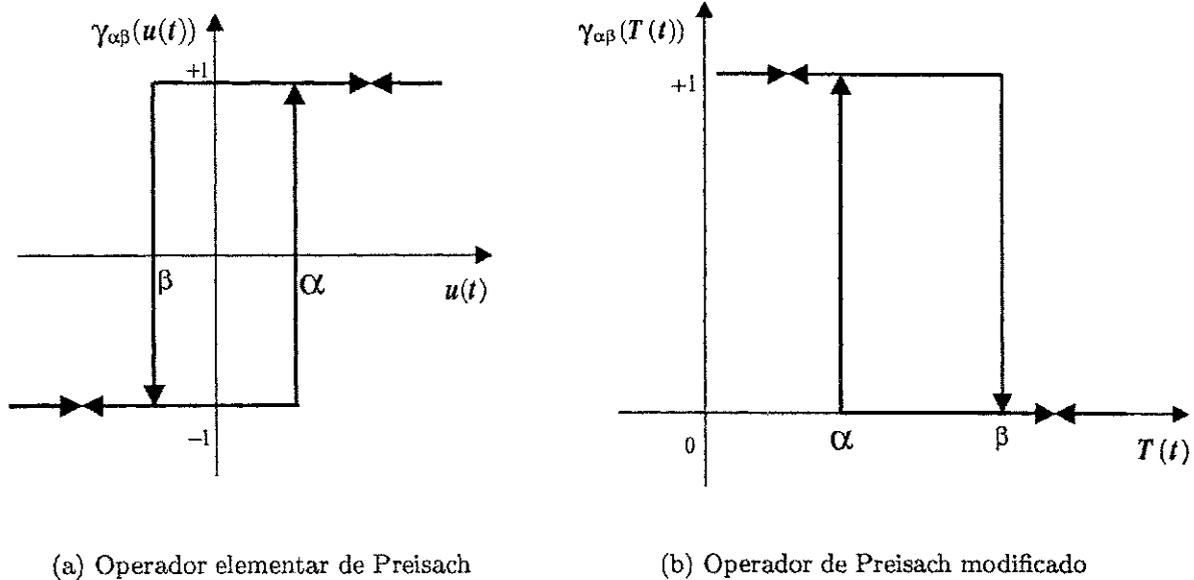


Figura 3.1: Histereses elementares

A histerese elementar modificada é definida apenas no primeiro quadrante do plano. A outra modificação em relação à histerese elementar de Preisach é que a grandeza de entrada é a temperatura. Considerando que  $T_\alpha$  e  $T_\beta$  são os limiares de transição do operador elementar. O operador elementar modificado é, novamente, um elemento biestável. Neste caso, quando o valor da excitação  $T(t)$  é menor que o limiar  $T_\alpha$  o operador assume o valor  $\gamma_{\alpha\beta}(T(t)) = +1$ ; quando o valor da excitação  $T(t)$  é maior que o limiar  $T_\beta$  o operador assume o valor  $\gamma_{\alpha\beta}(T(t)) = 0$ . Para um valor de excitação  $T_\alpha < T(t) < T_\beta$ , o estado do operador depende da história do sinal de excitação.

O modelo de Preisach modificado para representar a transmitância óptica pode ser descrito como a soma de operadores elementares  $\gamma_{\alpha\beta}$  que representam os estados dos microcristais ponderados por uma função de distribuição  $\mu(\alpha, \beta)$ . Assim, tem-se:

$$P(t) = \iint_{T_\alpha \leq T_\beta} \gamma_{\alpha\beta}(T(t)) \mu(T_\alpha, T_\beta) dT_\alpha dT_\beta \tag{3.1}$$

A Figura 3.2 mostra uma interpretação geométrica da equação (3.1) em termos do

denominado triângulo de Preisach modificado. O eixo de aquecimento é representado por  $T_\beta$  e o eixo de resfriamento é representado por  $T_\alpha$ .

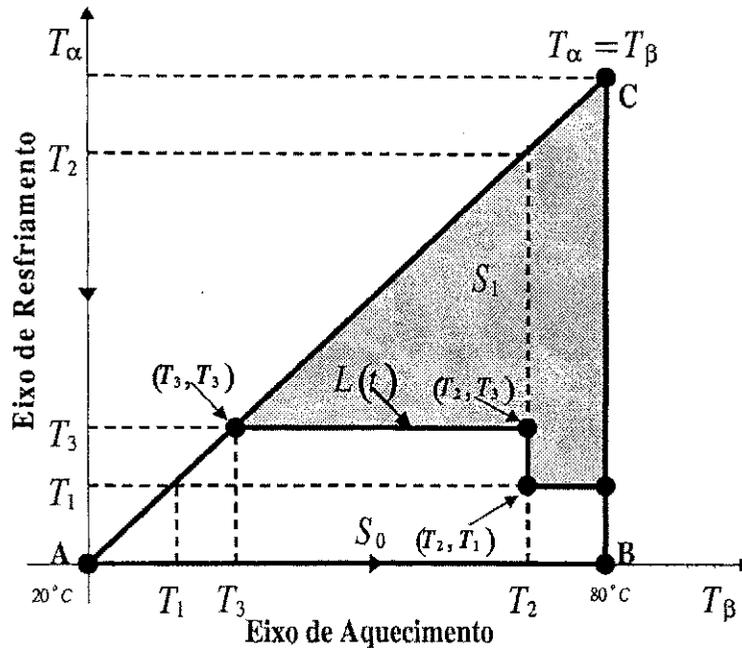


Figura 3.2: Triângulo de Preisach modificado.

Este triângulo está associado apenas com a parte que exhibe o fenômeno da histerese transmitância *versus* temperatura, e está restrito à faixa de  $20^\circ\text{C}$  a  $80^\circ\text{C}$ . Dessa forma, a função  $\mu(T_\alpha, T_\beta)$  é não nula apenas no interior do triângulo ABC, e é considerada nula no restante do plano.

Geometricamente, o triângulo de Preisach pode ser dividido em duas áreas,  $S_1$  e  $S_0$  que representam a parcela de contribuição dos operadores elementares nos estados +1 e 0, respectivamente. Uma linha de interface  $L(t)$  define uma subdivisão das áreas  $S_1$  e  $S_0$  que depende da história da excitação térmica. Admitindo que a temperatura de excitação, inicialmente, seja  $T_\alpha = T_\beta = 80^\circ\text{C}$ . Considerando que a temperatura de excitação tenha sido reduzida para um valor  $T_1$  e que em seguida seja aumentada para um valor  $T_2$ , essa variação na temperatura de excitação cria o vértice  $(T_2, T_1)$  da linha de interface  $L(t)$ . Se a temperatura for, novamente, reduzida para um valor  $T_3$ , um novo vértice  $(T_3, T_3)$  é criado e a forma da linha interface  $L(t)$  é definida, conforme mostrado na Figura 3.2. Os valores de reversão da variação de temperatura são sempre os vértices que caracterizam a forma de uma escada da linha interface  $L(t)$ . A memória do modelo de Preisach é representada por essa interface.

A transmitância óptica do sensor de filme fino de  $\text{VO}_2$  definida em termos do triângulo

de Preisach modificado é dada por:

$$P(t) = \iint_{ABC} \gamma_{\alpha\beta}(T(t)) \mu(T_\alpha, T_\beta) dT_\alpha dT_\beta \quad (3.2)$$

ou

$$P(t) = \iint_{S_1} \gamma_{\alpha\beta}(T(t)) \mu(T_\alpha, T_\beta) dT_\alpha dT_\beta + \iint_{S_0} \gamma_{\alpha\beta}(T(t)) \mu(T_\alpha, T_\beta) dT_\alpha dT_\beta \quad (3.3)$$

admitindo que  $\gamma_{\alpha\beta}(T(t)) = 1$  para  $S_1(t)$  e  $\gamma_{\alpha\beta}(T(t)) = 0$  para  $S_0(t)$ , tem-se:

$$P(t) = \iint_{S_1} \mu(T_\alpha, T_\beta) dT_\alpha dT_\beta \quad (3.4)$$

### 3.2.1 Propriedades do modelo de Preisach modificado

Fontana *et al.* [23], reescrevem as propriedades de remoção e congruência para os sensores de  $VO_2$  como:

- Remoção [23]: “Cada valor mínimo da entrada  $T(t)$  remove os vértices da linha de interface  $L(t)$  cujos valores representados no eixo de resfriamento ( $T_\alpha$ ) são maiores que esse mínimo e cada valor máximo de  $T(t)$  remove os vértices de  $L(t)$  cujos valores representados no eixo de aquecimento ( $T_\beta$ ) são menores que esse máximo”.
- Congruência [23]: “Todos os laços menores do plano de fase, centrados numa mesma temperatura  $T_0$ , deslocados verticalmente e que resultaram de uma mesma variação de temperatura  $\Delta T$  são congruentes”.

### 3.2.2 Implementação do modelo de Preisach modificado

O procedimento proposto por Mayergoyz [35] possibilita a identificação dos parâmetros da função de distribuição  $\mu(T_\alpha, T_\beta)$  a partir dos dados experimentais. A Figura 3.2.2 mostra uma curva decrescente de primeira ordem e a sua representação geométrica em termos do triângulo de Preisach.

Supondo-se que a temperatura varie de forma cíclica entre os limites mínimo ( $20^\circ C$ ) e máximo ( $80^\circ C$ ), esse tipo de excitação provoca o aparecimento de um ciclo limite na histerese da transmitância óptica. A variação cíclica da temperatura é representada no triângulo de Preisach pelos valores assumidos pelas áreas  $S_0$  e  $S_1$ . Para o limite mínimo,

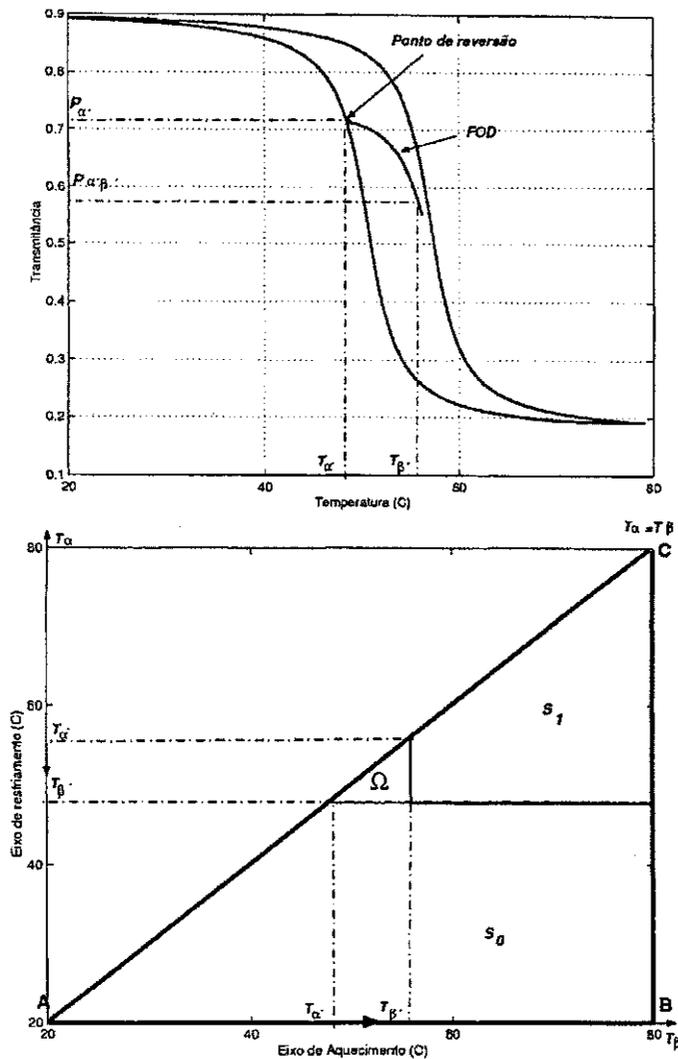


Figura 3.3: Determinação das curvas decrescente de primeira ordem

tem-se  $S_0 = 0$  e  $S_1 = 1$ ; e para o limite máximo, tem-se  $S_0 = 1$  e  $S_1 = 0$ . Se num instante qualquer acontecer uma reversão na variação da temperatura, por exemplo, na temperatura  $T_{\alpha'}$  ocorrer uma reversão e a temperatura é elevada para o valor  $T_{\beta'}$ , a curva que passa pelos pontos  $(T_{\alpha'}, P_{\alpha'})$  e  $(T_{\beta'}, P_{\alpha'\beta'})$  é a curva decrescente de primeira ordem (FOD). A essa curva pode-se associar uma área representada no triângulo de Preisach por  $\Omega$ .

Segundo Mayergoyz [35], a função de distribuição pode ser obtida pela análise do triângulo de Preisach. Dessa forma, pode-se definir:

$$F(T_{\alpha'}, T_{\beta'}) = \frac{1}{2} (P_{\alpha'} - P_{\alpha'\beta'}) \quad (3.5)$$

onde  $P_{\alpha'}$  é o valor da transmitância quando a excitação é  $T_{\alpha'}$ ,  $P_{\alpha'\beta'}$  é o valor da transmitân-

cia quando a excitação é elevada para  $T_{\beta'}$ . A equação (3.5) é igual a metade do incremento da saída ao longo da curva decrescente de primeira ordem. O próximo passo é expressar a equação (3.5) em termos da função de distribuição. É observado que o triângulo de área  $\Omega$  é somado à área  $S_0$  e subtraído da área  $S_1$ , usando este fato e a equação (3.4), tem-se:

$$P_{\alpha'\beta'} = \iint_{S_1} \mu(T_\alpha, T_\beta) dT_\alpha dT_\beta - \iint_{\Omega} \mu(T_\alpha, T_\beta) dT_\alpha dT_\beta \text{ e} \quad (3.6)$$

$$P_{\alpha'}(t) = \iint_{S_1} \mu(T_\alpha, T_\beta) dT_\alpha dT_\beta \quad (3.7)$$

subtraindo a equação (3.6) da equação (3.7), tem-se:

$$P_{\alpha'\beta'} - P_{\alpha'}(t) = - \iint_{\Omega} \mu(T_\alpha, T_\beta) dT_\alpha dT_\beta \text{ ou} \quad (3.8)$$

$$P_{\alpha'\beta'} - P_{\alpha'}(t) = - \iint_{T_{\alpha'\beta'}} \mu(T_\alpha, T_\beta) dT_\alpha dT_\beta \quad (3.9)$$

comparando as equações (3.9) e (3.5), tem-se:

$$-2F(T_{\alpha'}, T_{\beta'}) = - \iint_{T_{\alpha'\beta'}} \mu(T_\alpha, T_\beta) dT_\alpha dT_\beta \quad (3.10)$$

a integral sobre o triângulo de área  $\Omega$  pode ser escrita como:

$$2F(T_{\alpha'}, T_{\beta'}) = \int_{T_{\alpha'}}^{T_{\beta'}} \left( \int_{T_{\alpha'}}^{T_{\beta'}} \mu(T_\alpha, T_\beta) dT_\alpha \right) dT_\beta \quad (3.11)$$

diferenciando a equação (3.11) em relação a  $T_{\alpha'}$  e  $T_{\beta'}$ , obtém-se a função de distribuição a partir das curvas experimentais decrescente de primeira ordem, dada por:

$$\mu(T_{\alpha'}, T_{\beta'}) = \frac{2\partial^2 F(T_{\alpha'}, T_{\beta'})}{\partial T_{\alpha'} \partial T_{\beta'}} \quad (3.12)$$

a equação (3.12) pode ser reescrita a partir da equação (3.5) como:

$$\mu(T_{\alpha'}, T_{\beta'}) = - \frac{\partial^2 P_{\alpha'\beta'}(T_{\alpha'}, T_{\beta'})}{\partial T_{\alpha'} \partial T_{\beta'}} \quad (3.13)$$

Uma vez definida a função de distribuição, o modelo de Preisach pode ser implementado a partir da equação (3.4). A escolha da função de distribuição pode ser definida a partir de hipóteses do perfil das curvas decrescente de primeira ordem. As hipóteses utilizadas para definir a função de distribuição são:

- Todas as curvas decrescente de primeira ordem podem ser representadas por um conjunto de funções do tipo tangente hiperbólica;
- Os parâmetros da função que descreve as FODs variam, independentemente, com um outro conjunto de funções do tipo tangente hiperbólica.

Dessa forma, a escolha da função que representa as FODs pode ser tratado como um problema de identificação de sistemas. Recentemente, Sena *et al.* [45] propuseram a utilização da função dada por:

$$P_{\alpha'\beta'}(T_\alpha, T_\beta) = h(T_\alpha) \tanh \{j(T_\alpha) [T_\beta + g(T_\alpha)]\} + o(T_\alpha) \quad (3.14)$$

para representar a superfície. Nessa função

$$o(T_\alpha) = p_1 + p_2 \tanh \{p_3 [T_\alpha + p_4]\} \quad (3.15)$$

$$h(T_\alpha) = p_5 + p_6 \tanh \{p_7 [T_\alpha + p_8]\} \quad (3.16)$$

$$j(T_\alpha) = p_9 + p_{10} \tanh \{p_{11} [T_\alpha + p_{12}]\} \text{ e} \quad (3.17)$$

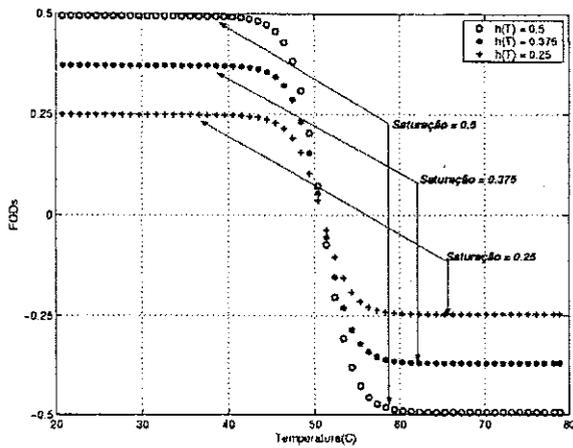
$$g(T_\alpha) = p_{13} + p_{14} \tanh \{p_{15} [T_\alpha + p_{16}]\} \quad (3.18)$$

sendo  $p = [p_1, \dots, p_{16}]$  um vetor de parâmetros a ser estimado a partir dos dados experimentais.

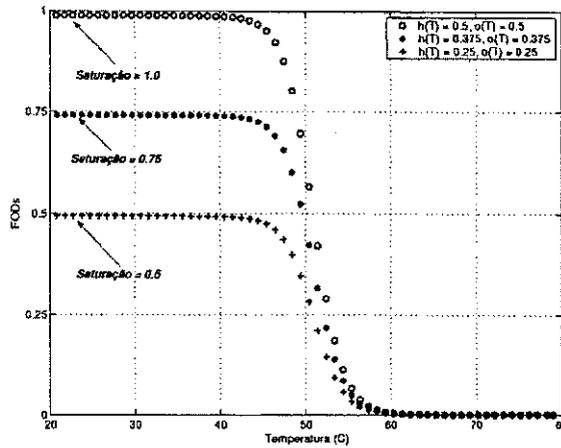
As funções  $h(T_\alpha)$ ,  $j(T_\alpha)$ ,  $g(T_\alpha)$  e  $o(T_\alpha)$  podem ser consideradas como parâmetros da equação (3.14) e o conjunto de valores definido por cada parâmetro resulta em uma curva FOD específica. No entanto, a variação isolada de cada parâmetro apresenta características próprias na forma das curvas decrescente de primeira ordem. As Figuras 3.4(a), 3.4(b), 3.4(c) e 3.4(d) mostram a influência individual das funções  $h(T_\alpha)$ ,  $o(T_\alpha)$ ,  $j(T_\alpha)$  e  $g(T_\alpha)$  na equação (3.14).

A Figura 3.4(a) mostra a influência da função  $h(T_\alpha)$  na definição da curva decrescente de primeira ordem. Essa função é simétrica em relação a origem do plano cartesiano e seu valor é máximo quando a temperatura tende ao limite de saturação superior e mínimo quando a temperatura tende ao limite de saturação inferior.

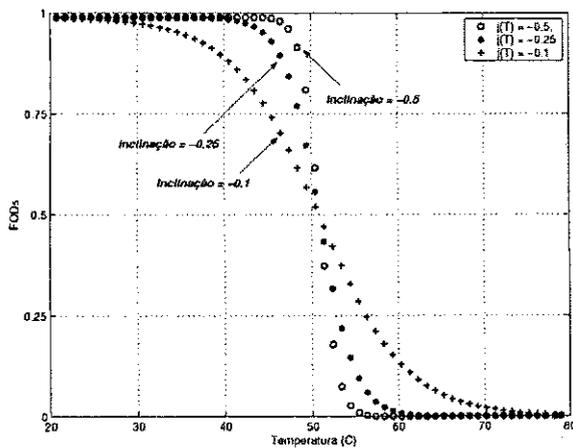
A Figura 3.4(b) mostra a influência da função  $o(T_\alpha)$  sobre a curva mostrada na Figura 3.4(a). A influência da função  $o(T_\alpha)$  é representada por um deslocamento positivo no eixo de amplitude da curva FOD. Admitindo que os valores das funções  $h(T_\alpha)$  e  $o(T_\alpha)$  sejam constantes e iguais a 0,5, 0,375 e 0,25 para ambas funções, a saturação inferior é zero e a saturação superior igual ao dobro do valor da função  $h(T_\alpha)$ .



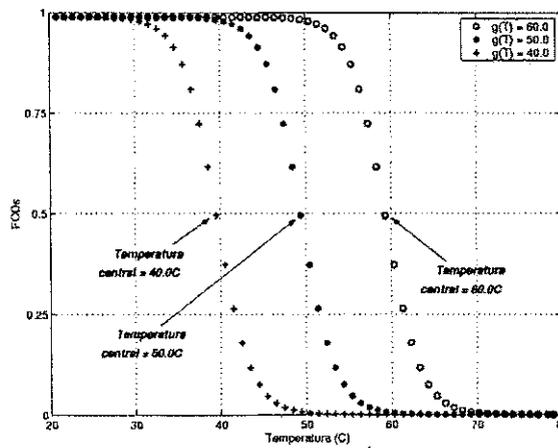
(a) Influência da função  $h(T_\alpha)$



(b) Influência das funções  $h(T_\alpha)$  e  $o(T_\alpha)$



(c) Influência da função  $j(T_\alpha)$



(d) Influência da função  $g(T_\alpha)$

Figura 3.4: Influência das funções  $h(T_\alpha)$ ,  $o(T_\alpha)$ ,  $j(T_\alpha)$  e  $g(T_\alpha)$  nas curvas decrescente de primeira ordem

A Figura 3.4(c) mostra que a função  $j(T_\alpha)$  é utilizada para determinar a inclinação das FODs. É observado que a suavidade da variação entre os valores de saturação superior e inferior da curva decrescente de primeira ordem depende exclusivamente da função  $j(T_\alpha)$ . Quanto menor o módulo da função  $j(T_\alpha)$  maior é a suavidade da variação entre os limites máximo e mínimo da curva.

O fenômeno de translação da curva decrescente de primeira ordem, ver Figura 3.4(d), é definido pela função  $g(T_\alpha)$ . O valor da função  $g(T_\alpha)$  representa a temperatura central para qual a curva FOD será transladada.

Combinando os valores das funções  $h(T_\alpha)$ ,  $o(T_\alpha)$ ,  $j(T_\alpha)$  e  $g(T_\alpha)$  é obtida uma superfície capaz de representar as curvas FODs da transmitância óptica do filme de  $VO_2$ . No entanto, o ajuste dessa superfície resulta em um problema de otimização paramétrica não-linear. Para resolver este tipo de problema Almeida *et al.* [9] utilizaram o método *simplex*. Entretanto, esse método realiza uma otimização local e, freqüentemente, o processo de busca da solução estaciona numa região próxima de um mínimo local. Para esse método, o problema pode ser evitado quando a estimativa paramétrica inicial é suficientemente próxima da solução ótima. Para evitar esse tipo de problema, Sena [44] propôs a utilização de um algoritmo genético para resolver o problema da identificação dos parâmetros da função.

De acordo com Sena [44], dois aspectos influenciam na implementação do modelo de Preisach: a sua implementação numérica e identificação dos parâmetros. A implementação numérica apresenta o inconveniente de usar os dados experimentais para interpolar a saída do modelo. A identificação dos parâmetros é, tipicamente, um problema de otimização não-linear multidimensional. O elevado número de parâmetros dificulta o uso de técnicas tradicionais de otimização.

### 3.3 Modelo de aproximação ao limite adiabático modificado

O modelo de aproximação ao limite adiabático, ver seção 2.3, é utilizado para descrever histereses simétricas e centradas na origem. Para a descrição completa da característica óptica do filme de  $VO_2$  propõe-se algumas adaptações no modelo de aproximação ao limite adiabático. A principal modificação está na escolha de uma nova função para representar o ciclo de equilíbrio adiabático do filme de  $VO_2$ , ver equação (3.19).

$$P_L(T(t), \delta) = P_0 + \frac{P_s}{\pi} \arctan \left( -h_0 \left( T(t) - T_c - \delta \frac{\omega}{2} + \frac{\pi}{2} \right) \right) \quad (3.19)$$

onde o operador  $\delta$  é definido como:

$$\delta = \begin{cases} +1 & \text{se } \frac{dT}{dt} > 0 \\ -1 & \text{se } \frac{dT}{dt} < 0 \end{cases} \quad (3.20)$$

e  $P_0$  é a saturação inferior da histerese,  $P_s$  a altura da histerese,  $T_c$  a temperatura central da histerese,  $T$  a temperatura de excitação,  $h_0$  um parâmetro de ajuste da histerese e  $\omega$  a largura da histerese óptica. A Figura 3.5 ilustra o ciclo limite da transmitância óptica do filme de  $VO_2$  e a identificação de seus parâmetros.

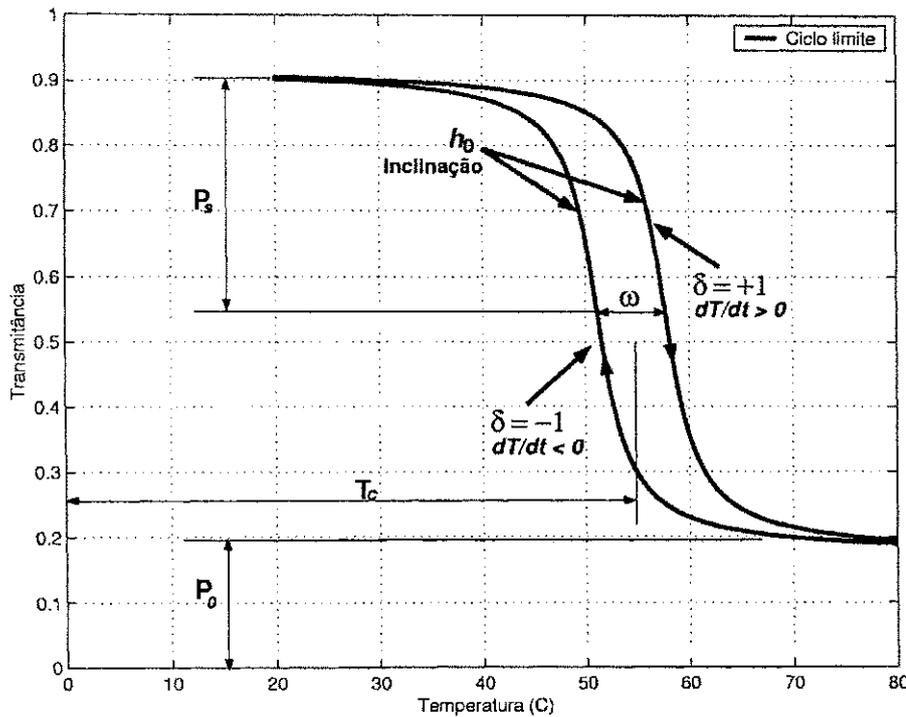


Figura 3.5: Ciclo limite da transmitância óptica do filme de  $VO_2$

O fenômeno da histerese da transmitância óptica do filme de  $VO_2$  é confinado no interior de um ciclo de equilíbrio adiabático. A função inversa para desse ciclo limite é dada por:

$$P_L^{-1}(T(t), \delta) = -\frac{1}{h_0} \tan\left(\frac{\pi(P(t) - P_0)}{P_s}\right) + \delta \frac{\omega}{2} + T_c \quad (3.21)$$

A função de aproximação ao limite adiabático para a transmitância óptica do filme de  $VO_2$  é dada por:

$$f_a(T(t)) = \begin{cases} \Delta T_0 \left[1 - \sin \zeta \left(\frac{T(t) - T_0(t)}{\Delta T_0}\right)\right] & , \zeta \left(\frac{T(t) - T_0(t)}{\Delta T_0}\right) < \frac{\pi}{2} \\ 0 & , \zeta \left(\frac{T(t) - T_0(t)}{\Delta T_0}\right) > \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (3.22)$$

onde  $\Delta T_0$  é a distância entre o ciclo limite e o último ponto de reversão, ou seja,  $\Delta T_0 = P_L^{-1}(T(t), \delta) - T(t_f, k-1)$ . A Figura 3.6 ilustra o comportamento da histerese que deixa um trecho ( $k-1$ ) e passa para um novo trecho ( $k$ ) através de um ponto de reversão  $[P(t_f, k-1), T(t_f, k-1)]$ , sendo  $t_f$  o instante final no trecho ( $k-1$ ).

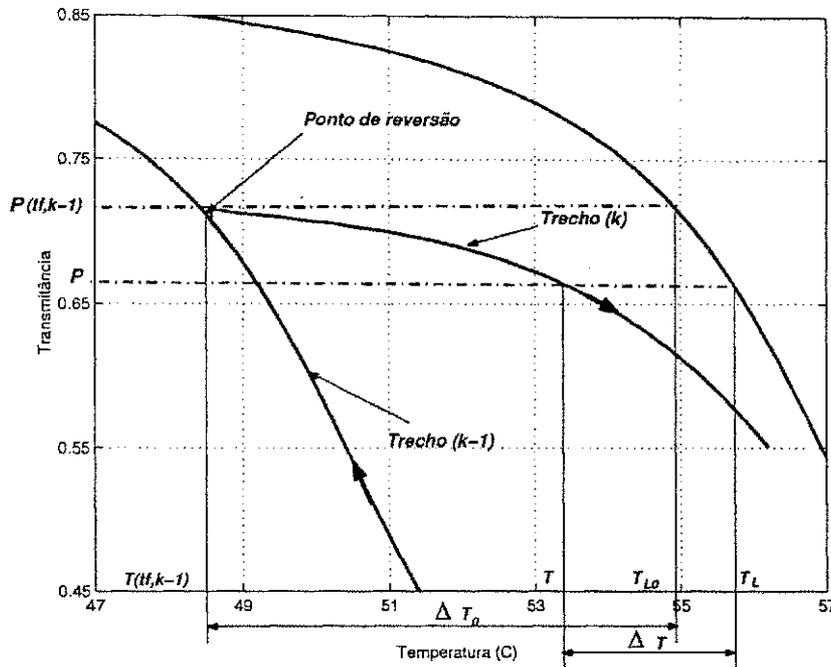


Figura 3.6: Comportamento da histerese óptica da transmitância e aproximação ao limite oposto

A aproximação da trajetória da histerese, no trecho ( $k$ ), pode ser calculada pela diferença entre a excitação  $T$  e o valor limite da excitação  $T_L = P_L^{-1}(P(t), \delta(k))$ .

### 3.3.1 Implementação do modelo de aproximação ao limite adiabático modificado

A implementação do modelo de aproximação ao limite adiabático modificado apresenta a mesma sequência de implementação do modelo de aproximação ao limite adiabático modificado, ver seção 2.3. Neste caso, o fenômeno da histerese transmitância óptica do filme fino de  $VO_2$ , é dada por:

$$P(t, k) = P_L \{T(t) + f_a(T, T_0, \Delta T_0), \delta(k)\} \quad (3.23)$$

A representação do ciclo limite da histerese da transmitância (Eq. 3.19) apresenta cinco parâmetros ( $P_0, P_s, T_c, h_0$  e  $\omega$ ) para serem obtidos. Os parâmetros  $P_0$  e  $T_c$  foram

adicionados no ciclo limite para deslocar a histerese da origem. Todos os parâmetros, exceto  $h_0$  e  $\zeta$ , são determinados graficamente dos valores experimentais do fenômeno da histerese óptica.

### 3.4 Conclusões

O modelo de Preisach e o modelo de aproximação ao limite adiabático foram modificados para descrever a histerese óptica do sensor de filme fino de  $VO_2$ . Para o modelo de Preisach foi modificado o operador elementar e para o modelo de aproximação ao limite adiabático foi modificado o ciclo limite de equilíbrio adiabático.

A função de distribuição utilizada na implementação do modelo de Preisach modificado é definida a partir do procedimento proposto por Mayergoyz e das hipóteses do comportamento dinâmico das curvas decrescente de primeira ordem.

O modelo de aproximação ao limite adiabático modificado apresenta como vantagem a simplicidade do algoritmo de implementação quando comparado ao modelo de Preisach. O algoritmo se resume na implementação de um equação algébrica recursiva.

Os resultados obtidos da implementação do modelo de Preisach modificado e do modelo de aproximação ao limite adiabático são apresentados no capítulo 6.

# Capítulo 4

## Plataforma Experimental

### 4.1 Introdução

Para o estudo das propriedades ópticas de sensores de filmes finos de  $VO_2$  foi desenvolvida uma plataforma experimental que permite uma variação controlada da temperatura do sensor entre  $20^\circ C$  a  $80^\circ C$ . A variação cíclica da temperatura entre os limites mínimo e máximo foi implementada utilizando um módulo termoeletrico.

Nas próximas seções apresenta-se a estrutura mecânica e óptica, os circuitos eletrônicos auxiliares e o sistema de aquisição de dados.

### 4.2 Estrutura mecânica e óptica

O diagrama da Figura 4.1 apresenta os elementos principais de uma plataforma de caracterização das propriedades ópticas do sensor de filme fino de  $VO_2$ . A fonte de luz que incide sobre o sensor é fornecida por um diodo *laser*. O sensor é instalado, juntamente com módulo termoeletrico, sobre um dissipador cuja temperatura é controlada eletronicamente através da corrente que alimenta o módulo termoeletrico.

As parcelas de radiação transmitida e refletida são captadas por detectores de radiação instalados, como ilustra a Figura 4.1. Dessa forma, parte da luz incidente é transmitida pelo filme de  $VO_2$  e incide sobre um detector de radiação que captura a luz transmitida. A outra parte da luz incidente é refletida pelo filme e incide sobre um outro detector de radiação que captura a luz refletida. No processo de caracterização das propriedades ópticas do filme de  $VO_2$  é considerado que a absorção é muito pequena e pode ser desprezada.

A transmitância ( $P$ ) é obtida calculando a razão entre a intensidade de luz transmitida ( $S_{trans}$ ) e a intensidade de luz incidente ( $S_{in}$ ) e a refletância ( $Q$ ) é obtida calculando a razão

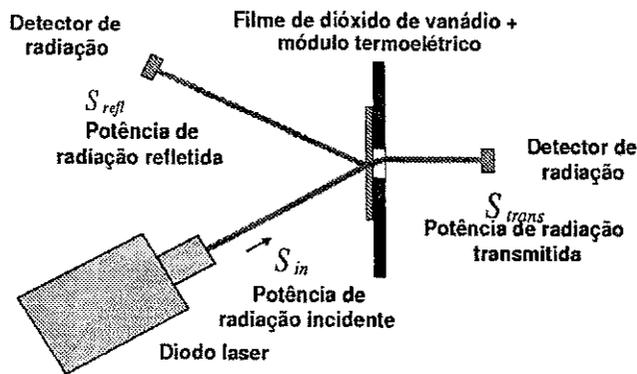


Figura 4.1: Esquema da montagem experimental

entre a intensidade de luz refletida ( $S_{refl}$ ) e a intensidade de luz incidente. Assim, tem-se que:

$$P = S_{trans}/S_{in} \quad e \quad Q = S_{refl}/S_{in} \quad (4.1)$$

A plataforma experimental utilizada para a caracterização da propriedade óptica de transmitância do filme de  $VO_2$  é constituída por um diodo *laser*, o filme de  $VO_2$  sobre um substrato de safira, um dispositivo termoeétrico e um fotodetector, ver Figura 4.2.

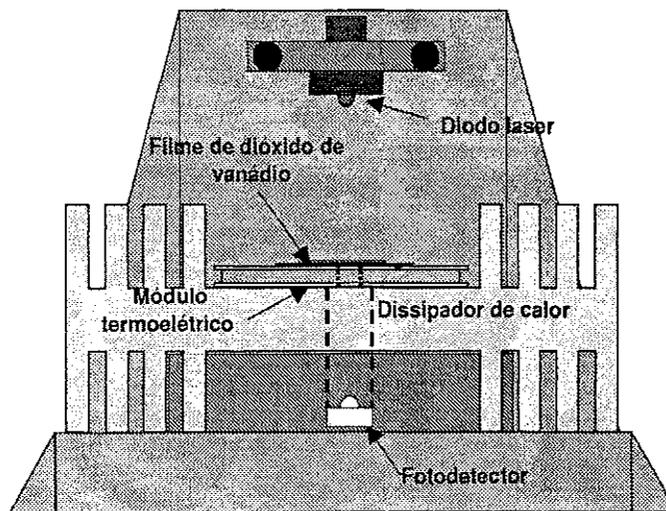


Figura 4.2: Vista frontal da plataforma experimental

O diodo *laser* utilizado é de luz visível (670nm), potência máxima 5mW, classe III, de fabricação da Coherent Auburn Group. Para simplificar a realização prática da Figura 4.1, na plataforma experimental utilizada nesse trabalho, o diodo *laser* foi instalado na

posição indicada na Figura 4.2 para que o feixe de luz incidisse, com intensidade constante, na direção perpendicular à superfície do filme.

O módulo termoeletrico ou módulo Peltier é utilizado para variar a temperatura entre  $20^{\circ}C$  a  $80^{\circ}C$ . O módulo peltier utilizado é o modelo *SH1.0 – 95 – 05L* de fabricação da Melcor Corporation, esse modelo opera com uma corrente máxima de  $3.9A$ , tensão máxima de  $11.5V$ , capacidade máxima de bombeamento de calor de  $25.1W$  e máxima variação de temperatura de  $67^{\circ}C$ . As dimensões físicas do módulo peltier são  $30 \times 30 mm$ , espessura de  $3.2 mm$  e apresenta um orifício vazado com diâmetro de  $14.5 mm$  no centro [38].

O filme de  $VO_2$  utilizado possui as dimensões de  $3 \times 3 mm$  e  $1000 \text{ \AA}$  de espessura depositado sobre um substrato de safira. O fotodetector utilizado é de fabricação da Texas Instruments, modelo *TSL251*, esse é constituído de um fotodiodo, um amplificador operacional, resistor e capacitor encapsulado num único circuito integrado [46].

## 4.3 Circuitos eletrônicos auxiliares

Os circuitos eletrônicos auxiliares são utilizados para alimentar e controlar o diodo *laser*, o fotodetector e o módulo termoeletrico. Dessa forma, três circuitos auxiliares foram desenvolvidos e foram denominados como: circuito fonte de luz, circuito do fotodetector e circuito de alimentação do módulo termoeletrico.

### 4.3.1 Circuito fonte de luz

O circuito fonte de luz é utilizado para alimentar o diodo *laser* e manter a intensidade de luz constante. A radiação de luz do diodo *laser* é mantida constante a partir de uma corrente constante circulando pela junção do componente. A Figura 4.3 ilustra o circuito utilizado para fixar uma corrente constante na junção do diodo *laser*. O circuito fonte de luz é composto por um amplificador operacional (*LM741*), um transistor de sinal ( $T_1 = BC557$ ), um resistor ( $R_1 = 370 \Omega$ ) e o diodo *laser* ( $D_{laser}$ ).

O circuito utilizado é, basicamente, um conversor tensão/corrente. Para uma tensão de entrada positiva constante  $V_i(t)$ , a tensão na saída do amplificador operacional  $V_o(t)$  é negativa, isso faz com que o transistor  $T_1$  conduza e polarize diretamente a junção do diodo *laser*. Para uma tensão  $V_i(t)$  negativa aplicada ao circuito, a tensão  $V_o(t)$  torna-se positiva e o transistor  $T_1$  é polarizado reversamente. Dessa forma, não irá circular corrente pelo diodo *laser*.

A Figura 4.4 mostra a corrente medida no diodo *laser* para a uma tensão  $V_i(t) = 5V$ . A corrente que circula na junção do diodo *laser* é aproximadamente constante ( $\approx 13,45 mA$ )

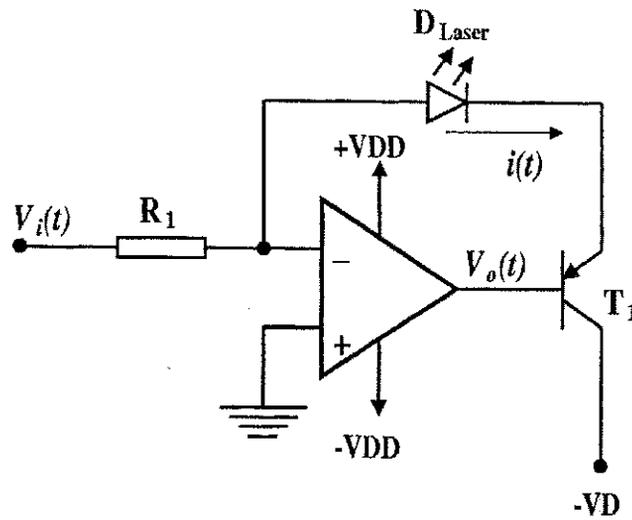


Figura 4.3: Circuito gerador de luz

e apresenta um desvio padrão de  $4.01\mu A$ .

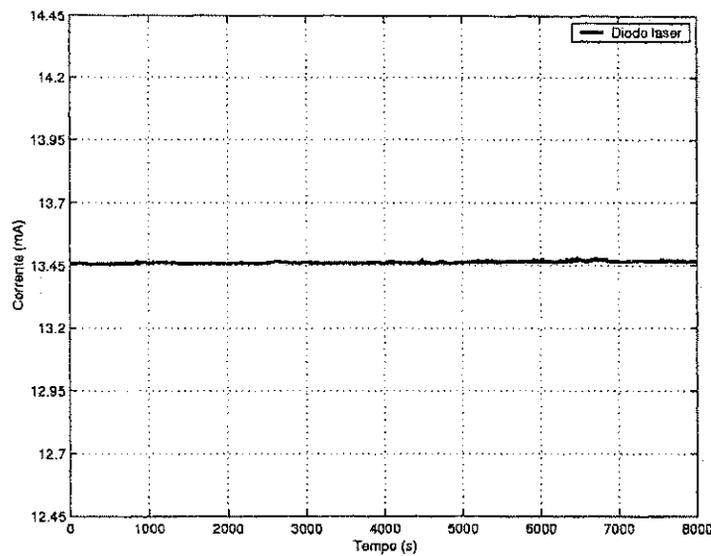


Figura 4.4: Corrente no diodo *laser*

É observado que mantendo a corrente constante na junção do diodo *laser* é garantido a uniformidade da intensidade de luz emitida pelo diodo *laser* pode ser considerada constante durante todo o experimento.

### 4.3.2 Circuito do fotodetector

A Figura 4.5 ilustra o circuito do fotodetector utilizado na plataforma experimental. O fotodetector, modelo *TSL251*, é fisicamente constituído por uma janela de detecção com uma área ativa de  $0.5\text{mm}^2$  e três terminais (saída, tensão de alimentação e terra) [46].

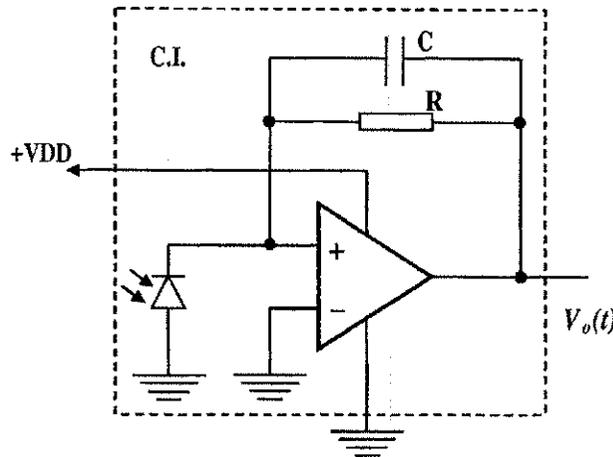


Figura 4.5: Circuito do fotodetector

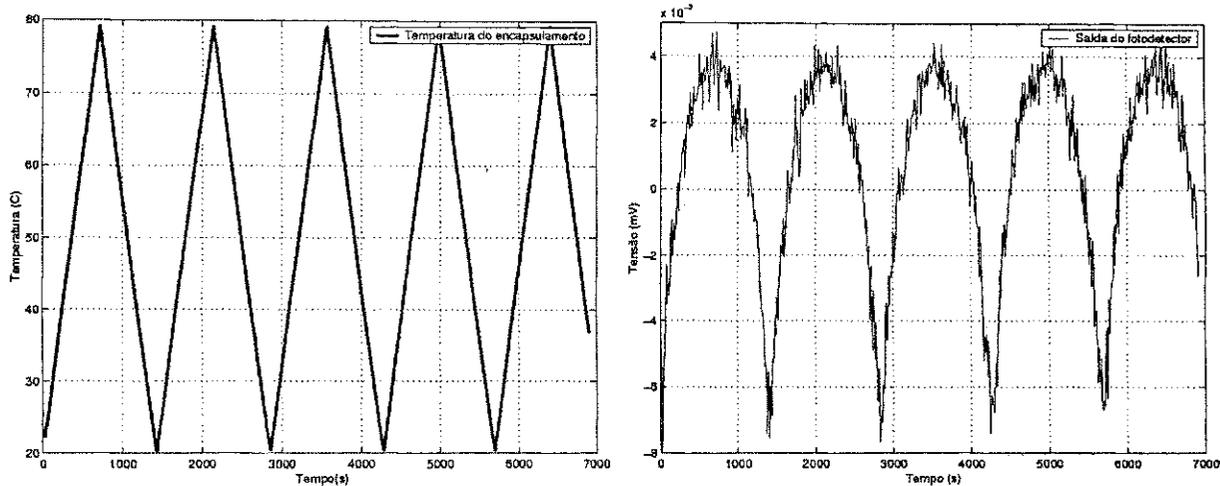
Esse fotodetector é sensível as radiações de luz com comprimento de onda entre  $300\text{nm}$  a  $1100\text{nm}$  do espectro luminoso. A maior sensibilidade espectral do fotodetector se encontra na região de luz visível, para o diodo *laser* utilizado a sensibilidade é de aproximadamente 90% da máxima sensibilidade espectral. A Tabela 4.1 mostra as principais características de operação do fotodetector [46].

Características de operação	Valores			Unidade
	Min	Nom	Max	
Tensão de alimentação	3	5	9	V
Temperatura de operação	-25	-	85	$^{\circ}\text{C}$
Corrente de saída	-	$\pm 10$	-	mA
Tensão de saída (aprox.)	1.5	3.5	7.2	V
Coefficiente térmico	-	$\pm 1$	-	$\text{mV}/^{\circ}\text{C}$

Tabela 4.1: Características de operação do fotodetector

A variação de temperatura provoca alterações na tensão de saída do fotodetector devido ao seu coeficiente térmico. Essa característica, especificamente, para a plataforma de carac-

terização óptica é indesejável pois a temperatura variará entre  $20^{\circ}\text{C}$  a  $80^{\circ}\text{C}$ . A Figura 4.6 mostra a influência do coeficiente térmico na saída do fotodetector. Esse teste foi realizado sem a presença de uma fonte de luz incidente na janela de detecção do fotodetector e a temperatura foi variada entre  $20^{\circ}\text{C}$  a  $80^{\circ}\text{C}$  com uma taxa de variação de  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .



(a) Temperatura do fotodetector

(b) Tensão no terminal de saída do fotodetector

Figura 4.6: Influência do coeficiente de temperatura: variação cíclica da temperatura entre  $20^{\circ}\text{C} - 80^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}$ .

Nesse teste, o fotodetector foi colocado juntamente com um termistor sobre um módulo Peltier. A variação da temperatura no encapsulamento do fotodetector, ver Figura 4.6(a), foi imposta e controlada pelo módulo termoelétrico e o termistor foi utilizado, indiretamente, para medir a temperatura do encapsulamento do fotodetector.

A Figura 4.6(b) mostra o surgimento de uma tensão no terminal de saída do fotodetector devido a variação de temperatura. É verificado que o sinal de tensão na saída do fotodetector segue o mesmo perfil da variação da temperatura de excitação e pode ser considerado invariante no tempo. Para uma variação de temperatura entre  $20^{\circ}\text{C}$  a  $80^{\circ}\text{C}$  no encapsulamento do fotodetector ocorre uma variação de aproximadamente  $12\text{mV}$  no terminal de saída.

A Figura 4.7 mostra a dependência térmica da tensão de saída do fotodetector. Novamente, o esse teste foi realizado sem a presença de uma fonte de luz incidente na janela de detecção do fotodetector e a temperatura do encapsulamento do fotodetector foi variada entre  $20^{\circ}\text{C}$  a  $80^{\circ}\text{C}$  com uma taxa de variação de  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . Os diversos traços apresentados na Figura 4.7 é devido aos cinco períodos de variação cíclica da temperatura no

encapsulamento do fotodetector, ver Figura 4.6(a).

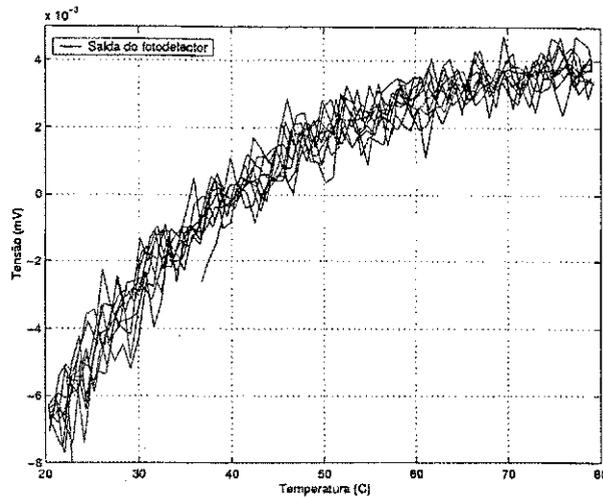


Figura 4.7: Característica do fotodetector no plano de fase tensão *versus* temperatura.

É observado a presença de uma deriva térmica na tensão de saída do fotodetector. No plano de fase tensão *versus* temperatura, a variação de  $60^{\circ}\text{C}$  na temperatura do fotodetector provoca uma variação em torno de  $10\text{mV}$  no terminal de saída. Essa característica não-linear deve ser modelada e compensada nos dados experimentais.

A modelagem de sistemas, normalmente, é associada as ferramentas de identificação e construção de modelos. Ljung [33], detalhou um procedimento para a construção de modelos que envolve três passos:

1. um conjunto de dados entradas/saídas;
2. um conjunto de modelos candidatos (ou estrutura de modelos) e
3. uma regra pela qual os modelos candidatos possam ser avaliados a partir do conjunto de dados.

Utilizando esse procedimento a modelagem da dependência térmica do fotodetector é resolvida. Os passos para o problema proposto podem ser resumidos como:

- **Passo 1:** O conjunto de dados de entrada e saída são as medições experimentais apresentadas nas Figuras 4.6(a) e 4.6(b), respectivamente.
- **Passo 2:** Um modelo possível para representar a dependência térmica é dado pela equação 4.2,

$$y(x) = \alpha \ln(x) - \beta \tag{4.2}$$

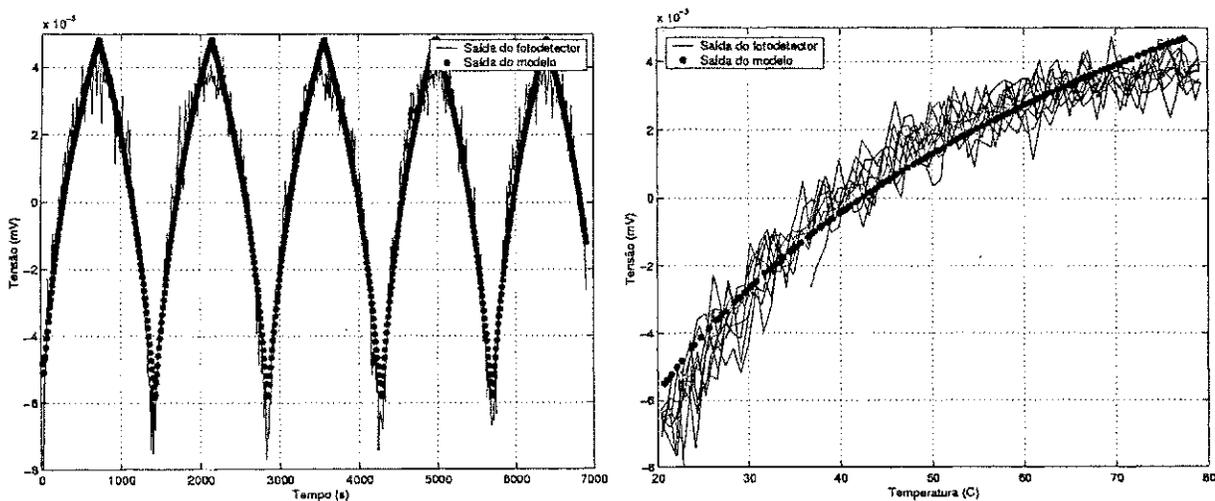
na forma matricial, tem-se:

$$y(x) = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ln(x) & -1 \end{bmatrix} \tag{4.3}$$

onde  $x$  equivale a temperatura e  $y$  a tensão de saída do fotodetector. A escolha do modelo algébrico foi definida a partir da análise comportamental do fotodetector no plano de fase tensão *versus* temperatura.

- **Passo 3:** O método dos mínimos quadrados é utilizado como regra para avaliar e validar o modelo. Esse método pode ser utilizado pois o modelo proposto é linear nos parâmetros que serão identificados.

Os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  encontrados para o modelo proposto são 0.007913 e 0.029745, respectivamente. As Figuras 4.8(a) e 4.8(b) mostram as curvas experimentais e modelada do fotodetector no domínio do tempo e no plano de fase tensão *versus* temperatura, respectivamente.



(a) Domínio do tempo

(b) Plano de fase

Figura 4.8: Modelagem da dependência térmica do fotodetector

Observa-se que o modelo algébrico escolhido representa de forma satisfatória o comportamento do fotodetector e que o erro absoluto é minimizado em toda a faixa de interesse. Um modelo polinomial de segunda ordem também foi testado. No entanto, esse modelo apresentou um erro absoluto maior que o modelo algébrico. Outros modelos poderiam representar melhor a dependência térmica e minimizar, ainda mais, o erro absoluto. No entanto, o modelo proposto representa adequadamente a deriva térmica do fotodetector. Esse modelo será utilizado, no capítulo 6, para compensar os dados experimentais que descreve a histerese característica das propriedades ópticas do filme de  $VO_2$ .

### 4.3.3 Circuito de alimentação do módulo termoeétrico

O módulo termoeétrico (*TEM*) é utilizado para controlar a temperatura da plataforma experimental. Um circuito do tipo conversor tensão/corrente pode ser utilizado para alimentar e controlar o módulo termoeétrico. Na seção 5.4 será mostrado que a quantidade de calor fornecida pelo módulo termoeétrico depende da corrente que circula nos terminais do dispositivo. O módulo termoeétrico pode esfriar ou aquecer dependendo do sentido da corrente que circula nos seus terminais. Dessa forma, o circuito de conversão tensão/corrente deve fornecer corrente nos dois sentidos para que o controle de temperatura seja adequado.

A Figura 4.9 ilustra o circuito conversor tensão/corrente utilizado para acionar e controlar o dispositivo termoeétrico. Esse circuito é, basicamente, uma fonte de corrente controlada por tensão.

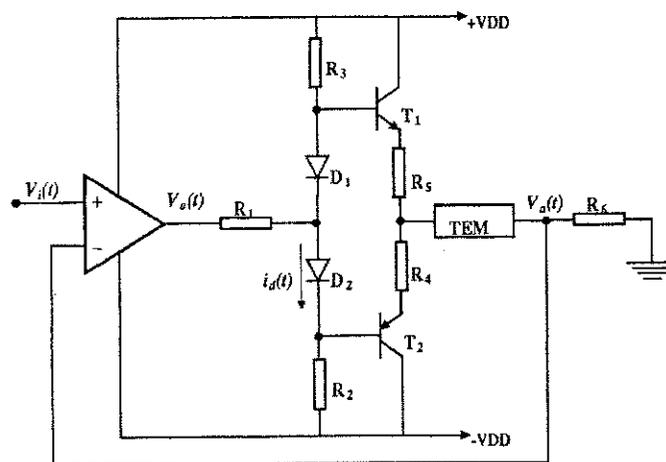


Figura 4.9: Circuito conversor tensão/corrente

A Tabela 4.2 apresenta as especificações dos componentes utilizado no circuito conversor tensão/corrente.

Componentes	Especificação
Amplificador operacional	<i>LM741</i>
Transistor - $T_1$	<i>TIP122</i>
Transistor - $T_2$	<i>TIP127</i>
Diodos $D_1$ e $D_2$	<i>1N4148</i>
Resistor - $R_1$	$56\Omega - 1/2W$
Resistores - $R_2$ e $R_3$	$1k\Omega - 1/2W$
Resistores - $R_4$ e $R_5$	$33\Omega - 5W$
Resistor - $R_6$	$47\Omega - 5W$
TEM	<i>SM1.0 - 95 - 05L</i>

Tabela 4.2: Especificação dos componentes do circuito conversor tensão/corrente

Os diodos ( $D_1, D_2$ ) e os resistores ( $R_2, R_3$ ) formam uma malha de proteção contra deriva térmica. O efeito de deriva térmica pode ocorrer, por exemplo, quando um transistor dissipa muita potência e a temperatura da sua junção aumenta. Esse efeito provoca uma redução da tensão base-emissor ( $V_{be}$ ), conseqüentemente, ocorre um aumento na corrente de emissor. Essa característica gera um efeito avalanche, pois o aumento da corrente provoca um aumento, ainda maior, da dissipação de potência até levar o transistor a saturação.

Em alguns casos práticos, a tensão base-emissor ( $V_{be}$ ) de um transistor pode ser considerada igual a tensão ânodo-cátodo ( $V_{ak}$ ) de um diodo (aproximadamente  $0.7V$ ). No circuito conversor tensão/corrente foi considerado que essas duas tensões são iguais e que os transistores e os diodos são colocados em contato térmico. O controle contra deriva térmica é implementado da seguinte forma: se a temperatura aumentar, a tensão  $V_{ak}$  do diodo  $D_1$ , por exemplo, irá diminuir junto com a tensão  $V_{be}$  do transistor  $T_1$ , isso provoca um aumento na corrente do diodo reduzindo a corrente de base do transistor e, conseqüentemente, reduzindo a corrente de emissor evitando efeito avalanche.

Aplicando uma tensão positiva ( $V_i(t)$ ) na entrada do amplificador operacional, a tensão de saída ( $V_o(t)$ ) será positiva e polariza diretamente o transistor  $T_1$ . A malha de realimentação do amplificador é fechada e surge um curto-circuito virtual entre as entradas positivas e negativas do amplificador operacional. Uma corrente  $i(t)$  dada por  $i(t) = V_i(t)/R_6$  irá circular pelo circuito. Essa corrente é a mesma que irá circular no dispositivo termoelétrico, ver Figura 4.9. O efeito da não linearidade do transistor é compensado pelo alto ganho de malha aberta do amplificador operacional. Essa característica resulta uma corrente linear

em relação a tensão de entrada.

Se  $V_i(t)$  for uma tensão negativa, a tensão  $V_o(t)$  do amplificador operacional também será negativa e polariza reversamente o transistor  $T_1$ . Esse assume o estado de corte e o amplificador operacional é levado a saturação. No entanto, o transistor  $T_2$  (*TIP127*), ver Figura 4.9, funciona como transistor complementar de  $T_1$  e a corrente  $i(t)$  circulará pelo transistor  $T_2$ . Dessa forma, o circuito terá uma corrente definida e controlada para tensões  $V_i(t)$  positivas e negativas.

A corrente de saída do circuito conversor tensão/corrente é dada por:

$$i(t) = KV_i(t)$$

onde  $K$  é o ganho do circuito.

A Figura 4.10 mostra o ganho a relação da tensão de entrada do circuito e a corrente de saída.

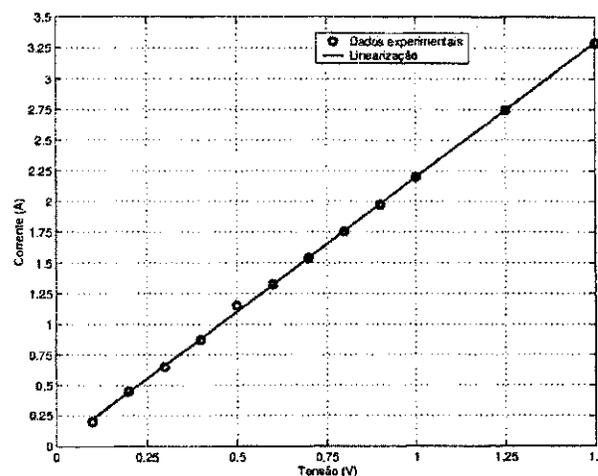


Figura 4.10: Resposta do conversor tensão/corrente

O ganho calculado a partir da linearização dos dados experimentais é  $2.195A/V$ . A resposta do circuito conversor tensão/corrente é linear em toda a faixa de operação. Essa característica simplifica o controle da corrente no módulo termoeletrico.

## 4.4 Sistema de aquisição de dados

Os sistemas de aquisição de dados constituem uma forma de ligação entre o mundo analógico e o digital com auxílio de computadores. Esse processo pode ser realizado de duas formas: através da conexão direta como o barramento do computador (*internal bus*) ou através de

um canal de comunicação padrão, tal como *RS232*, *RS422* ou *IEEE488 (external bus)*. Esses dois tipos de sistemas de aquisição de dados apresentam vantagens e desvantagens. A conexão indireta permite a configuração de sistemas de qualquer tamanho mesmo quando esses se situam a uma grande distância do computador. A conexão direta se destaca pela alta velocidade de comunicação, baixo custo e tamanho reduzido.

Almeida [4], desenvolveu uma plataforma de caracterização da propriedade da propriedade elétrica do filme de  $VO_2$  utilizando uma instrumentação baseada na interface de comunicação *IEEE488*. Essa interface possibilita a leitura e escrita de dados, como por exemplo, a aquisição da resistência elétrica e gerar o sinal de controle da temperatura do filme. No entanto, a interface *IEEE488* necessita de um tempo mínimo de acesso ao barramento ( $\approx 200ms$ ), para melhorar o desempenho cada grandeza física a ser medida ou controlada precisa de um instrumento dedicado e o tempo mínimo de resposta é, aproximadamente, um segundo para a plataforma de caracterização proposta.

O sistema de aquisição e controle de dados da plataforma experimental de caracterização óptica do filme de  $VO_2$ , ver Figura 4.11, utiliza uma placa de aquisição instalada no barramento do computador. Essa placa substitui toda a instrumentação externa de medição e garante uma alta taxa de amostragem do sistema de aquisição e controle.

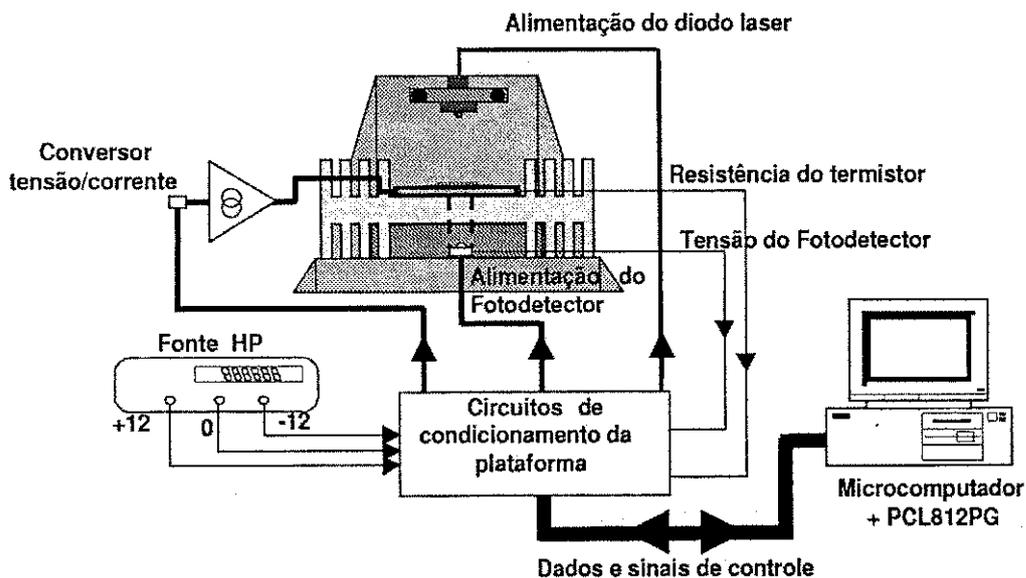


Figura 4.11: Sistema de aquisição e controle da plataforma experimental

O sistema de aquisição e controle da plataforma de caracterização óptica é constituído de circuitos de condicionamento de sinais, um microcomputador, uma placa de aquisição de uso geral com ganhos programáveis e um programa dedicado. A placa, modelo *PCL – 812PG* da Advantech, dispõe de 16 entradas analógica (conversor A/D de 12 bits multiplexado)

bipolares (com ganho programável), um contador/temporizador programável 8253 – 5 da Intel (com frequência máxima de  $2MHz$ ) e duas saídas analógicas de 12 *bits* [1]. O programa dedicado que inclui as rotinas de aquisição de dados e o controle em tempo real da plataforma foi desenvolvido em linguagem *C*.

As rotinas de aquisição de dados e controle são utilizadas com uma taxa de amostragem de  $50ms$  em todos os testes apresentados no capítulo 6. No entanto, essa taxa de amostragem é variável de acordo com a necessidade ou exigência do projeto, sendo que a menor taxa de amostragem é igual a  $3.33\mu s$ . O programa dedicado gera um arquivo de saída no formato *ASCII* que é facilmente importado e analisado no *software* MatLab.

## 4.5 Conclusões

A montagem experimental da estrutura mecânica e óptica foi desenvolvida utilizando os recursos disponíveis no laboratório, isto é, não foram utilizadas lentes para correção do *laser*, mesas ópticas para evitar vibração e sala isolada para minimizar possíveis perturbações eletromagnéticas e termodinâmicas. No entanto, a plataforma experimental possibilitou extrair resultados satisfatórios para a caracterização das propriedades ópticas dos filmes de fino de  $VO_2$ .

Os circuitos eletrônicos auxiliares foram testados individualmente para o diodo *laser*, o fotodetecotor e o módulo termoeletrico e, posteriormente, foram montados em placa de circuito impresso. O circuito gerador de luz garante uma corrente constante no diodo laser e conseqüentemente uma intensidade de luz constante. O circuito do fotodetector é responsável apenas pela alimentação do componente e circuito do módulo termoeletrico garante a linearidade da corrente de saída do circuito para toda a faixa de interesse.

O modelo obtido para o fotodetector representa de forma satisfatória a dependência térmica do dispositivo e minimiza o erro de leitura da transmitância óptica em toda faixa de interesse ( $20^{\circ}C$  a  $80^{\circ}C$ ). No entanto, outros conjuntos de modelos candidatos poderiam ser explorados para obter uma modelagem mais precisa do fenômeno.

O sistema de aquisição de dados e controle utiliza conexão direta com o barramento do computador através de uma placa de aquisição de uso geral. Essa opção garante a implementação de estratégias de controle em tempo real e aquisição de dados com uma taxa de amostragem muito superior a plataforma de caracterização da propriedade elétrica.

Os resultados experimentais obtidos da plataforma de caracterização óptica do filme de  $VO_2$  são apresentados no capítulo 6.

# Capítulo 5

## Sistema de controle

### 5.1 Introdução

O sistema de controle da plataforma experimental deve ser capaz de variar e controlar a temperatura do filme de  $VO_2$  entre  $20^\circ C$  a  $80^\circ C$ . Essas variações da temperatura da plataforma são obtidas utilizando um módulo Peltier como bomba de calor que impulsiona ou retira calor da plataforma.

Uma modelagem do módulo Peltier utilizando a linearização em torno de um ponto de operação permite o projeto de um controlador de temperatura utilizando as técnicas de controle tradicionais.

Nas próximas seções apresentam-se o módulo Peltier, o controle de temperatura da plataforma, a modelagem do módulo Peltier e o projeto do controlador da plataforma experimental.

### 5.2 Módulo Peltier

Os módulos termoelétricos ou módulos Peltier são constituídos de semicondutores tipo  $p$  e tipo  $n$  conectados eletricamente em série por metalização entre duas placas cerâmicas isolantes elétrica e condutoras térmicas [50]. A operação desses módulos pode ser associada a quatro fenômenos físicos: o efeito Seebeck, o efeito Peltier, o efeito Thomson e o efeito Joule [19]. A Figura 5.1 ilustra um típico módulo Peltier.

Os módulos Peltier têm sido empregado em diversas aplicações, destacam-se: módulos microeletrônicos, módulos de refrigeração, dispositivos para reduzir ruídos indesejáveis de circuitos integrados, aplicações militares e aeroespaciais [26, 50].

Os módulos Peltier funcionam como uma pequena bomba de calor [32]. Quando uma

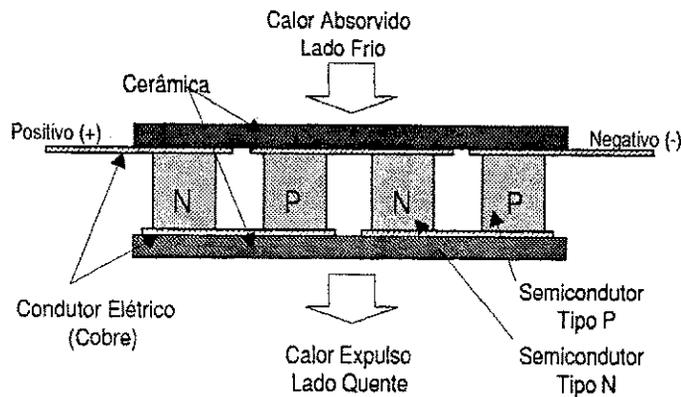


Figura 5.1: Módulo Peltier

corrente é aplicada nos terminais do módulo Peltier, o calor é deslocado de um lado denominado de face fria para o outro lado denominado face quente. Assim, uma face do módulo esfriará enquanto que a outra face simultaneamente aquecerá. O efeito da mudança de polaridade da corrente que circula nos terminais do módulo provoca uma mudança no sentido do fluxo de calor, conseqüentemente, a face fria esquentará e a face quente esfriará.

### 5.3 Controle de temperatura da plataforma

Na plataforma experimental, ver seção 4.2, o módulo Peltier é utilizado para variar a temperatura do filme fino de  $VO_2$ . A variação da temperatura da plataforma experimental (estrutura mecânica + módulo Peltier + filme + termistor) apresenta uma dinâmica característica de um sistema não-linear. A Figura 5.2 ilustra o diagrama de blocos do controle de temperatura da plataforma experimental.

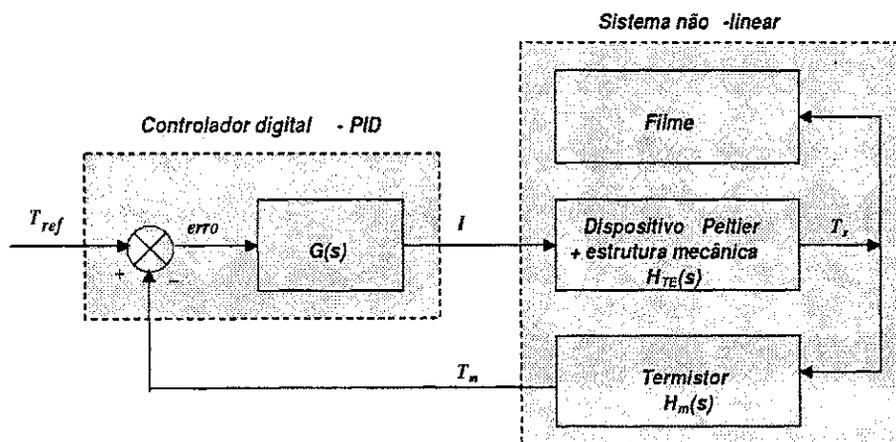


Figura 5.2: Diagrama de bloco do controle de temperatura

A temperatura de referência ( $T_{ref}$ ) é a temperatura desejada no filme de  $VO_2$  e a temperatura ( $T_m$ ) é a temperatura medida do filme de  $VO_2$  utilizando um termistor. O sinal de erro ( $T_{ref} - T_m$ ) é utilizado pelo controlador digital para gerar um sinal de tensão como ação de controle para o módulo Peltier. Esse sinal é convertido em uma corrente, ver seção 4.3.3, que circula pelo módulo Peltier e modifica a temperatura do filme de  $VO_2$  para seguir a temperatura de referência.

Para implementar o controlador de temperatura é indispensável a modelagem da plataforma experimental. Na literatura, encontra-se algumas abordagens para a modelagem de módulos Peltier. Chavéz *et al.* [19], propõem a modelagem do módulo Peltier baseado na analogia entre grandezas térmicas e elétricas. Huang e Duang [27], propõem um modelo dinâmico para o módulo Peltier baseado na teoria de linearização para pequenos sinais. Lima *et al.* [32], propõem um modelo dinâmico simplificado linearizado em torno de um ponto de operação para os módulos Peltier.

## 5.4 Modelagem do módulo Peltier

A modelagem do módulo Peltier pode ser realizada a partir da contribuição do fluxo de energia por unidade de volume do módulo, ver Figura 5.3.

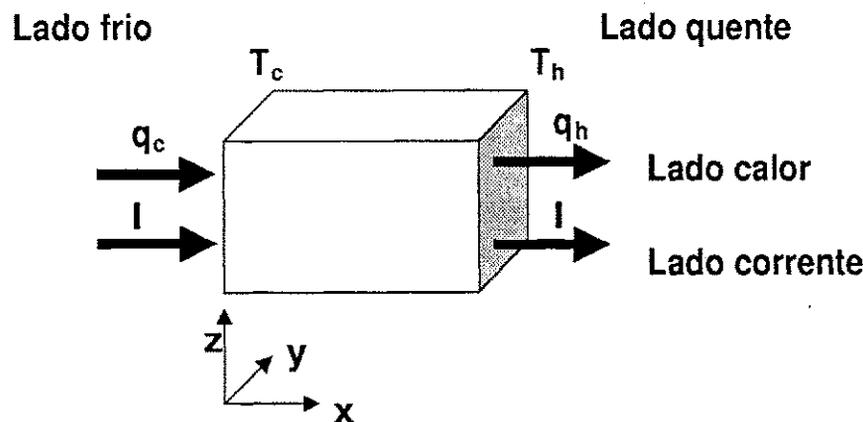


Figura 5.3: Definição do fluxo de corrente e calor no módulo Peltier

Em regime permanente, a contribuição do fluxo de energia através de uma unidade de volume do fenômeno associado com os dispositivos termoelétrico pode ser descrito como:

$$\underbrace{TJ \frac{d\alpha}{dx}} + \underbrace{\tau J \frac{dT}{dx}} - \underbrace{\rho J^2} - \underbrace{\frac{d}{dx} \left( k \frac{dT}{dx} \right)} = 0 \quad (5.1)$$

onde:  $T$  = temperatura ( $K$ );  $J$  = densidade de corrente elétrica ( $A/cm^2$ );  $k$  = condutividade térmica do material ( $Wm^{-1}K^{-1}$ );  $\tau$  = coeficiente de Thomson ( $V/K$ );  $\rho$  = resistividade elétrica ( $\Omega cm$ ) e  $\alpha$  = coeficiente de Seebeck ( $V/K$ ).

Considerando-se o módulo Peltier um par de junções semicondutoras diferentes (semicondutor tipo  $p$  e  $n$ ) e assumindo que as propriedades de transporte do módulo Peltier apresentam um valor médio e constante, a equação (5.1) pode ser apresentada para o semicondutor tipo  $n$  como:

$$k_N \frac{d^2 T}{dx^2} - \tau_N J \frac{dT}{dx} + \rho_N J^2 = 0 \quad (5.2)$$

e para o semicondutor tipo  $p$  como:

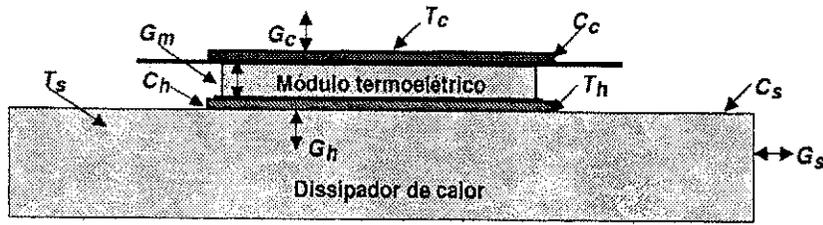
$$k_P \frac{d^2 T}{dx^2} + \tau_P J \frac{dT}{dx} + \rho_P J^2 = 0 \quad (5.3)$$

onde  $k_N, \tau_N, \rho_N, k_P, \tau_P$  e  $\rho_P$  são os valores médios das propriedades do módulo Peltier [19]. Dessa forma, a temperatura do módulo Peltier pode ser encontrada a partir da solução do sistema de equações diferenciais parciais de segunda ordem.

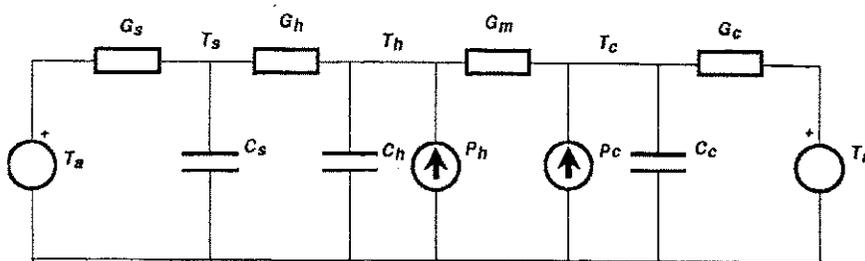
A modelagem do módulo Peltier a parâmetros distribuídos, equações (5.2) e (5.3), não viabiliza o projeto de um controlador de temperatura para a plataforma experimental. Neste caso, optou-se por uma modelagem do módulo Peltier que possa ser representada por parâmetros concentrados. Nesse tipo de modelagem pode-se utilizar as técnicas tradicionais para a implementação do controlador de temperatura.

Segundo Chavéz *et al.* [19], analisando o sistema físico e admitindo algumas hipótese no funcionamento do módulo é possível propor um circuito elétrico equivalente para representar o módulo Peltier. As Figuras 5.4(a) e 5.4(b) ilustram o sistema físico da plataforma experimental (dissipador térmico + módulo Peltier + meio ambiente) e o circuito elétrico equivalente, respectivamente.

onde:  $T_a$  = temperatura ambiente ( $K$ );  $T_h$  = temperatura face quente ( $K$ );  $T_c$  = temperatura face fria ( $K$ );  $T_s$  = temperatura no dissipador de calor ( $K$ );  $C_h$  = capacitância térmica face quente ( $J/K$ );  $C_c$  = capacitância térmica face quente ( $J/K$ );  $C_s$  = capacitância térmica do dissipador de calor ( $J/K$ );  $G_s$  = condutância térmica do dissipador de



(a) Sistema físico



(b) Circuito equivalente

Figura 5.4: Representação do sistema físico e do circuito elétrico equivalente do módulo Peltier

calor para meio ambiente ( $W/K$ );  $G_h$  = condutância térmica face quente para dissipador de calor ( $W/K$ );  $G_c$  = condutância térmica face fria para camada térmica ( $W/K$ );  $G_m$  = condutância interna do módulo Peltier ( $W/K$ );  $P_h$  = potência de calor face quente ( $W$ ) e  $P_c$  = potência de calor face fria ( $W$ ).

As equações (5.4) e (5.5) representam a potência de calor nas faces fria e quente, respectivamente.

$$P_c = \frac{1}{2} I^2 R_m - \alpha T_c I \tag{5.4}$$

$$P_h = \frac{1}{2} I^2 R_m + \alpha T_h I \tag{5.5}$$

onde  $R_m$  é a resistência ôhmica do módulo Peltier.

Analisando o circuito equivalente utilizando as leis de Kirchoff para as correntes, verifica-se que utilizando três equações o sistema é descrito completamente. As equações são:

$$G_s(T_a - T_s) = G_h(T_s - T_h) + C_s \frac{d}{dt} T_s \quad (5.6)$$

$$G_h(T_s - T_h) + P_h = G_m(T_h - T_c) + C_h \frac{d}{dt} T_h \quad (5.7)$$

$$G_m(T_h - T_c) + P_c + G_c(T_a - T_c) = C_c \frac{d}{dt} T_c \quad (5.8)$$

isolando as derivadas e agrupando os termos semelhantes, tem-se:

$$\frac{d}{dt} T_s = - \left( \frac{G_s + G_h}{C_s} \right) T_s + \frac{G_h}{C_s} T_h + \frac{G_s}{C_s} T_a \quad (5.9)$$

$$\frac{d}{dt} T_h = \frac{G_h}{C_h} T_s - \left( \frac{G_h + G_m}{C_h} \right) T_h + \frac{G_m}{C_h} T_c + \frac{\alpha}{C_h} T_h I + \frac{R_m}{2C_h} I^2 \quad (5.10)$$

$$\frac{d}{dt} T_c = \frac{G_m}{C_c} T_h - \left( \frac{G_c + G_m}{C_c} \right) T_c + \frac{\alpha}{C_c} T_c I + \frac{G_c}{C_c} T_a + \frac{R_m}{2C_c} I^2 \quad (5.11)$$

definindo os estados do sistema  $x_1, x_2$  e  $x_3$  para  $T_s, T_h$  e  $T_c$ , respectivamente; e  $u_1$  e  $u_2$  para as entradas  $T_a$  e  $I$ , respectivamente. As equações de espaço de estados do módulo Peltier são:

$$\dot{x}_1 = - \left( \frac{G_s + G_h}{C_s} \right) x_1 + \frac{G_h}{C_s} x_2 + \frac{G_s}{C_s} u_1 \quad (5.12)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{G_h}{C_h} x_1 - \left( \frac{G_h + G_m}{C_h} \right) x_2 + \frac{G_m}{C_h} x_3 + \frac{\alpha}{C_h} x_2 u_2 + \frac{R_m}{2C_h} u_2^2 \quad (5.13)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{G_m}{C_c} x_2 - \left( \frac{G_c + G_m}{C_c} \right) x_3 + \frac{\alpha}{C_c} x_3 u_2 + \frac{G_c}{C_c} u_1 + \frac{R_m}{2C_c} u_2^2 \quad (5.14)$$

O sistema descrito pelas equações (5.12) a (5.14) é um sistema não-linear e, também, é conhecido como um sistema bilinear. Um sistema é denominado bilinear quando tem-se um produto entre entradas e estados. Esse modelo apresenta dois estados,  $x_1$  e  $x_2$ , que não são acessíveis, ou seja, as temperaturas  $T_s$  e  $T_h$  não podem ser medidas diretamente com a plataforma experimental.

A Figura 5.5 mostra o resultado experimental e o simulado para a temperatura da face fria do módulo Peltier para uma excitação na forma de um degrau de corrente de 0.1A. As equações (5.12) a (5.14) que representam o circuito equivalente do módulo Peltier foram implementadas utilizando o *software* Simulink da MathWorks, Inc.

A Tabela 5.1 mostra os parâmetros das equações de espaço de estados do módulo Peltier. Esses parâmetros foram determinados a partir das informações disponíveis nos catálogos do fabricante [38].

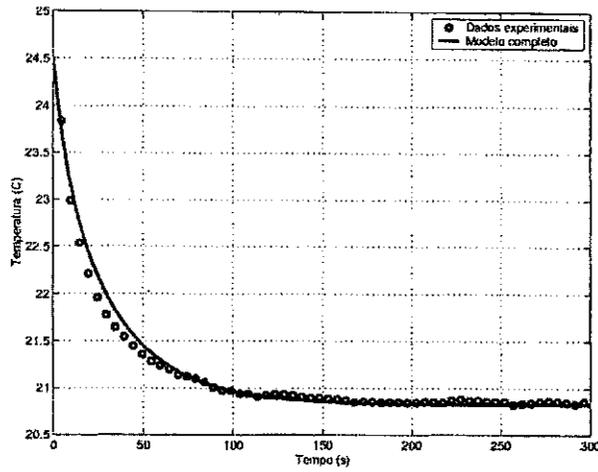


Figura 5.5: Resultado experimental e simulado da temperatura da face fria para um degrau de corrente de 0.1A.

Parâmetros	Valores	Unidade
$G_s$	0.83	W/K
$G_m$	0.64	W/K
$G_c$	0.05	W/K
$G_h$	40.0	W/K
$C_s$	12.0	J/K
$C_h$	0.5	J/K
$C_c$	0.5	J/K
$\alpha$	0.05	V/K
$R_m$	1.0	$\Omega$

Tabela 5.1: Parâmetros do módulo Peltier

É observado, ver Figura 5.5, que o modelo representa completamente a dinâmica não-linear do módulo Peltier. No entanto, o controle de sistema bilineares não possibilita a utilização das extratécnicas de controle típicas. Neste caso, tem-se duas opções: a utilização de um modelo simplificado para representar a dinâmica não-linear ou a utilização de técnicas de controle para sistemas bilineares. Neste trabalho, optou-se em utilizar um modelo simplificado juntamente com as técnicas de controle típica.

Lima *et al.* [32], propõem um modelo linearizado no tempo contínuo para o módulo Peltier. Esse modelo inclui um dissipador de calor e cargas térmicas. Para desenvolver um modelo simplificado foi utilizado um modelo equivalente elétrico para representar o módulo Peltier. A Figura 5.6 ilustra o modelo simplificado do sistema térmico mostrado na Figura 5.4(a) representado pelo seu circuito elétrico equivalente.

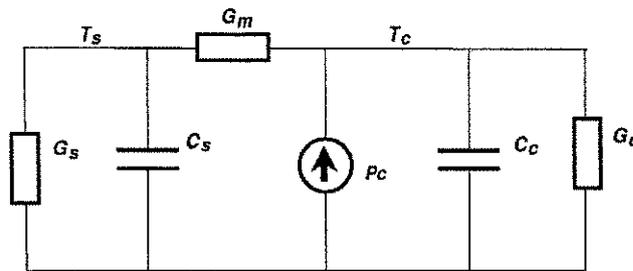


Figura 5.6: Circuito elétrico simplificado do módulo Peltier

Algumas considerações possibilitam apresentar a Figura 5.6 como o modelo simplificado da Figura 5.4(b). Dentre as considerações, destacam-se: o valor da capacitância do dissipador de calor é consideravelmente maior que os valores das capacitâncias do módulo Peltier ( $C_s \gg C_h$  e  $C_s \gg C_c$ ); o contato térmico entre a face quente e o dissipador de calor é muito bom e pode-se considerar que  $G_h \gg G_m$  e a temperatura ambiente ( $T_a$ ) pode ser considerada constante sem perda de generalidade. Com estas considerações, o efeito da potência elétrica sobre a face fria do módulo Peltier pode ser representado como mostra a Figura 5.6. Além dessas considerações, tem-se que o tempo de resposta da temperatura  $T_s$  da potência elétrica é consideravelmente menor que o tempo de resposta da temperatura  $T_c$  para uma excitação de potência da face fria. Utilizando o modelo simplificado para descrever a resposta da face fria  $T_c$  em função de uma corrente  $I$ , pode-se verificar uma dependência não-linear na temperatura.

Analisando o circuito equivalente simplificado, ver Figura 5.6, utilizando as leis de Kirchoff para as correntes, tem-se:

$$G_m (T_c - T_s) = G_s T_s + C_s \frac{d}{dt} T_s \quad (5.15)$$

$$P_c = G_m (T_c - T_s) + G_c T_c + C_c \frac{d}{dt} T_c \quad (5.16)$$

isolando as derivadas e agrupando os termos semelhantes, tem-se:

$$\frac{d}{dt} T_s = - \left( \frac{G_m + G_s}{C_s} \right) T_s + \frac{G_m}{C_s} T_c \quad (5.17)$$

$$\frac{d}{dt} T_c = \frac{G_m}{C_c} T_s - \left( \frac{G_m + G_c}{C_c} \right) T_c - \frac{\alpha}{C_c} T_c I + \frac{R_m}{2C_c} I^2 \quad (5.18)$$

definindo os estados do sistema  $x_1$  e  $x_2$  para  $T_s$  e  $T_c$ , respectivamente; e  $u_2$  para a entrada  $I$ , tem-se:

$$\dot{x}_1 = - \left( \frac{G_m + G_s}{C_s} \right) x_1 + \frac{G_m}{C_s} x_2 \quad (5.19)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{G_m}{C_c} x_1 - \left( \frac{G_m + G_c}{C_c} \right) x_2 - \frac{\alpha}{C_c} x_2 u_2 + \frac{R_m}{2C_c} u_2^2 \quad (5.20)$$

O sistema descrito pelas equações (5.19) e (5.20) é, novamente, um sistema bilinear e apresenta um estado ( $x_1$ ) que não é mensurável diretamente. No entanto, efetuando uma análise de pequenos sinais no modelo simplificado do módulo Peltier, pode-se explicitar uma relação linear entre  $T_c$  e  $I$  e, uma função de transferência linear é determinada [32].

Considerando que a operação do módulo Peltier é limitada para uma região em torno da temperatura  $T_c = T_o$ . Uma corrente constante  $I_o$  é necessária para atingir esta temperatura, e a corrente  $I$  pode ser representada como

$$I = I_o + I_\delta \quad (5.21)$$

onde  $I_\delta$  é a corrente que representa a excitação de um pequeno sinal. No ponto de operação ( $I_o, T_o$ ) pode-se definir que:

$$\left. \frac{\partial P_c}{\partial I_\delta} \right|_{I=I_o, T_c=T_o} = R_m I_o - \alpha T_o \quad (5.22)$$

o modelo linearizado que depende do ponto de operação ( $I_o, T_o$ ) é dado por:

$$H_{TE}(s) = \frac{\Delta T_c(s)}{\Delta I(s)} = K_H \frac{(s + a)}{s^2 + bs + c} \quad (5.23)$$

onde:

$$K_H = \frac{1}{C_c} (R_m I_o - \alpha T_o) \quad (5.24)$$

$$a = \frac{G_m + G_s}{C_s} \quad (5.25)$$

$$b = \frac{C_c G_m + C_c G_s + G_c C_s + G_m G_s}{C_c C_s} \quad (5.26)$$

$$c = \frac{G_m G_s + G_c G_m + G_c G_s}{C_c C_s} \quad (5.27)$$

Dessa forma, tem-se um modelo de segunda ordem linearizado, ver equação (5.23), que representa a dinâmica do módulo Peltier em torno de um ponto de operação. É observado que o ganho do sistema é variável e depende da corrente de operação ( $I_o$ ) e da temperatura ( $T_o$ ). Neste caso, o projeto de um controlador com ganho escalonado é próprio para o controle de temperatura da plataforma experimental.

A Figura 5.7 mostra o resultado experimental e o simulado para a temperatura da face fria do módulo Peltier para uma excitação na forma de um degrau de corrente de 0.1A. O módulo Peltier simplificado foi simulado utilizando o *software* MatLab da MathWorks, Inc.

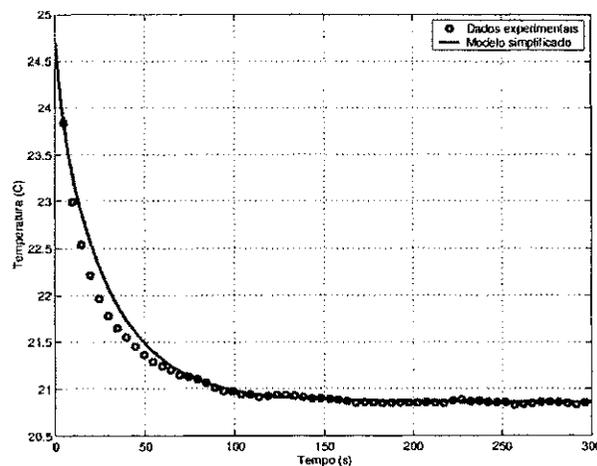


Figura 5.7: Resultado experimental e simulado da temperatura da face fria do módulo Peltier simplificado para um degrau de corrente de 0.1A.

A Tabela 5.2 mostra os parâmetros das equações de espaço de estados do módulo Peltier simplificado. Esses parâmetros constituem um subconjunto dos parâmetros do módulo Peltier completo apresentado na Tabela 5.1.

É observado que o modelo representa satisfatoriamente a dinâmica do módulo Peltier. Dessa forma, os modelos do módulo Peltier completo e simplificado, ver Figuras 5.5 e 5.7,

Parâmetros	Valores	Unidade
$G_s$	0.83	$W/K$
$G_m$	0.64	$W/K$
$G_c$	0.05	$W/K$
$C_s$	12.0	$J/K$
$C_c$	0.5	$J/K$
$\alpha$	0.05	$V/K$
$R_m$	1.0	$\Omega$

Tabela 5.2: Parâmetros do módulo Peltier simplificado

representam de forma satisfatória o comportamento do módulo Peltier. No entanto, o modelo do módulo Peltier simplificado que utiliza a linearização em torno de um ponto de operação apresenta vantagem de representar o comportamento do módulo Peltier utilizando um sistema linear de segunda ordem.

## 5.5 Projeto do Controlador

Como a temperatura de referência apresenta grandes variações na amplitude (até  $60^\circ C$ ), o sistema que representa o módulo Peltier pode ser modelado com uma função de transferência de ganho variável e o sistema de controle deve rastrear a temperatura de referência com o menor erro possível, um controlador PID de ganho escalonado foi implementado para o controle da temperatura da plataforma de caracterização da óptica do filme de  $VO_2$ .

Para o projeto do controlador PID com ganho escalonado, necessariamente, requer-se conhecer o comportamento da planta em diversas faixas de operação. Neste caso, a identificação do módulo Peltier para os diversos pontos de operação da corrente de excitação foi obtida utilizando um sinal de corrente retangular ( $10mV_{pp}$  de amplitude e  $0.001Hz$  de frequência) sobreposto a um valor de corrente constante. A Tabela 5.3 mostra o comportamento do modelo simplificado do módulo Peltier (ganho, pólos e zero) para nove pontos de operação. A identificação do módulo Peltier foi realizada utilizando o *toolbox* de identificação do *software* MatLab da MathWorks, Inc. O módulo Peltier foi modelado a partir de um modelo paramétrico do tipo ARX (autoregressivo) e o erro médio quadrático foi utilizado para validar o modelo.

Observa-se que o sistema é estável para todos os pontos de operação, isto é, todos

Entrada / Saída		Sistema			
Corrente (A)	Temperatura(°C)	Ganho	Zero	Pólos	Erro
-0.1597	18.0	0.087	-4.775	(-1.976; -0.00573)	0.0404
$3.89 \times 10^{-6}$	24.0	0.065	-4.472	(-1.272; -0.00345)	0.0911
0.1065	31.0	0.203	-5.604	(-3.617; -0.00509)	0.0461
0.3727	43.0	0.235	-5.773	(-3.913; -0.00467)	0.0482
0.4792	53.0	0.297	-5.814	(-3.982; -0.00385)	0.0917
0.5325	58.0	0.309	-5.890	(-4.113; -0.00431)	0.0699
0.596	64.0	0.275	-6.189	(-4.607; -0.00391)	0.141
0.708	73.0	0.319	-6.598	(-5.242; -0.00426)	0.0793
0.7987	83.0	0.298	-6.915	(-5.707; -0.00375)	0.0973

Tabela 5.3: Identificação do Módulo Peltier

os pólos dos sistemas identificados são localizados no semi-plano esquerdo. No entanto, verifica-se que o ganho, o zero e os pólos variam proporcionalmente com a corrente de excitação. Para uma variação de aproximadamente 70% na corrente de excitação, o ganho do sistema, o zero e os pólos do sistema variam 490%, 147% e 450%, respectivamente.

O modelo para pequenos sinais do módulo Peltier, ver equação (5.23), não contempla a variação da locação do zero e dos pólos. Esse modelo deve ser redefinido para representar as características reais do módulo Peltier. No processo de coleta de dados para a identificação do sistema foi verificado que a temperatura ambiente influencia diretamente no processo de identificação, ou seja, um ou mais parâmetros da plataforma experimental depende da temperatura ambiente.

Analisando o sistema físico da plataforma experimental foi detectado que a condutância térmica do dissipador de calor para meio ambiente é o parâmetro mais sensível a variação da temperatura ambiente. Dessa forma, a Figura 5.8 ilustra o novo modelo simplificado do sistema térmico.

onde:  $G_s(T_a)$  é a condutância térmica do dissipador de calor para meio ambiente que depende da temperatura ambiente. Assim, a função de transferência do módulo Peltier pode ser redefinida e é dada por:

$$H_{TE}(s) = \frac{\Delta T_c(s)}{\Delta I(s)} = K_H \frac{(s + a(T_a))}{s^2 + b(T_a)s + c(T_a)} \quad (5.28)$$

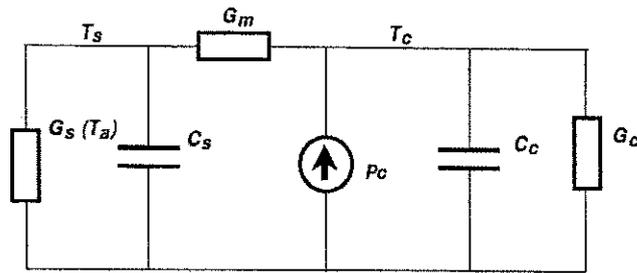


Figura 5.8: Circuito elétrico simplificado dependente da temperatura

onde:

$$K_H = \frac{1}{C_c} (R_m I_o - \alpha T_o) \quad (5.29)$$

$$a(T_a) = \frac{G_m + G_s(T_a)}{C_s} \quad (5.30)$$

$$b(T_a) = \frac{C_c G_m + C_c G_s(T_a) + G_c C_s + G_m G_s(T_a)}{C_c C_s} \quad (5.31)$$

$$c(T_a) = \frac{G_m G_s(T_a) + G_c G_m + G_c G_s(T_a)}{C_c C_s} \quad (5.32)$$

É observado que qualquer variação da temperatura ambiente ( $T_a$ ), o zero e os pólos do módulo Peltier são modificados. Assim, tem-se um novo modelo linearizado de segunda ordem que representa de forma precisa o módulo Peltier. Huang e Duang [27], propuseram um modelo linearizado de segunda ordem com dois pólos e um zero variáveis para representar o módulo Peltier. No entanto, não utilizaram a analogia de circuitos elétricos para a modelagem e linearização do módulo Peltier. Dessa forma, verifica-se que utilizando duas abordagens distintas tem-se modelos similares para a linearização do módulo Peltier.

Utilizando um controlador PID de ganho, zeros e pólo escalonados pode-se projetar um controlador de temperatura para a plataforma experimental a partir do novo modelo linearizado do módulo Peltier. A função de transferência do controlador PID escalonado é dada por:

$$G(s) = K_G \frac{s^2 + b_1 s + b_0}{s(s + a_1)} \quad (5.33)$$

A constante de tempo do termistor pode ser desprezada quando comparada com a constante de tempo de  $H_{TE}(s)$ . Dessa forma, a função de transferência de malha fechada é dada por:

$$\frac{\Delta T_c(s)}{\Delta T_{ref}(s)} = \frac{G(s) H_{TE}(s)}{1 + G(s) H_{TE}(s)} \quad (5.34)$$

Os valores dos parâmetros  $K_G$ ,  $b_1$ ,  $b_0$  e  $a_1$  podem ser calculados utilizando a metodologia de projeto de controladores por cancelamento de pólos e zeros. No entanto, esses parâmetros devem ser recalculados para cada ponto de operação. Assim, por exemplo, se a corrente de excitação for igual a  $-0.1597A$  para obter o cancelamento de pólos e zero, tem-se  $a_1 = 4.775$ ,  $b_1 = -1.976$  e  $b_0 = -0.00573$ . Por outro lado, se a corrente de excitação for igual a  $0.7987A$ , novos parâmetros serão utilizados para obter o cancelamento de pólos e zero, esses parâmetros são:  $a_1 = 6.915$ ,  $b_1 = -5.707$  e  $b_0 = -0.00375$ . Dessa forma, a função de transferência de malha fechada torna-se:

$$\frac{\Delta T_c(s)}{\Delta T_{ref}(s)} = \frac{K_G K_H}{s + K_G K_H} \quad (5.35)$$

Admitindo que o pólo de malha fechada do sistema seja  $-5b$ , tem-se:

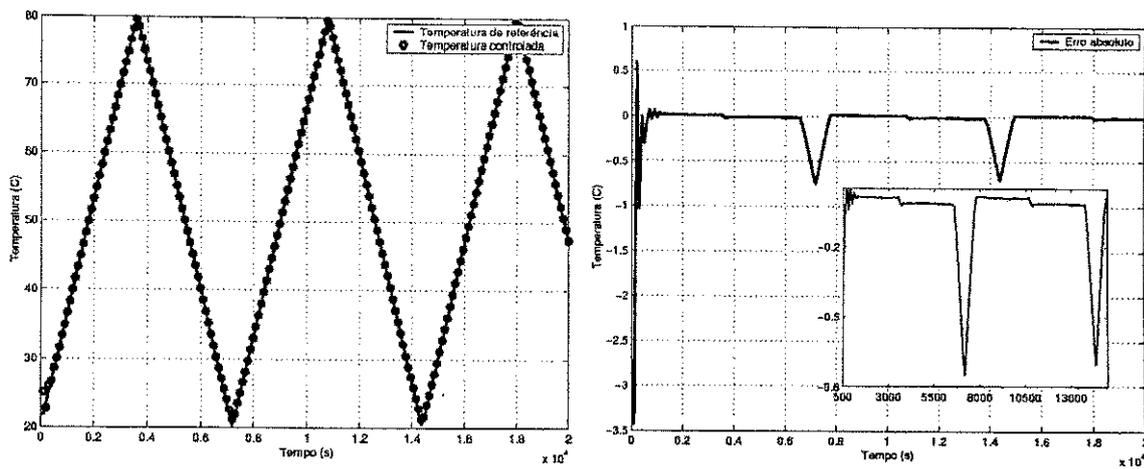
$$K_G = \frac{5b}{K_H} \quad (5.36)$$

desde que o ganho e os parâmetros do controlador sejam calculados para cada ponto de operação, a alocação do pólo de malha fechada não sofre nenhuma alteração.

O controlador PID escalonado foi implementado digitalmente, ver seção 4.4, utilizando uma placa de aquisição de uso geral com ganhos programáveis e um programa dedicado.

As Figuras 5.9(a) e 5.9(b) mostram as temperaturas (referência e medida) e o erro absoluto da temperatura, respectivamente. O controlador PID escalonado foi utilizado para rastrear a temperatura de referência.

É visivelmente observado que a temperatura de referência e a temperatura medida são coincidentes. Em detalhes (Fig. 5.9(b) interior), é constatado que o controlador tem um desempenho muito bom na maior parte da faixa de temperatura (erro absoluto  $< 0.1^\circ C$ ). O desempenho do controlador é comprometido nas mudanças de derivada da temperatura de referência, o erro absoluto atinge  $0.8^\circ C$  e se reduz rapidamente quando se afasta da descontinuidade. 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  $VO_2$  o controle utilizado é suficiente para a realização do experimento com sucesso.



(a) Temperaturas: referência e medida

(b) Erro absoluto entre as temperaturas

Figura 5.9: Resultado obtido na implementação do controlador PID escalonado

## 5.6 Conclusões

O módulo Peltier foi utilizado para variar e controlar a temperatura da plataforma experimental entre  $20^{\circ}\text{C}$  a  $80^{\circ}\text{C}$ . Para facilitar o projeto do controlador de temperatura o módulo foi linearizado em torno de um ponto de operação. Assim, para pequenos sinais o módulo Peltier se comporta como um sistema linear de segunda ordem e facilita a implementação do controlador de temperatura.

O controlador de temperatura do tipo PID escalonado foi implementado digitalmente utilizando uma placa de aquisição de dados e um microcomputador. O controlador, de modo geral, apresenta um desempenho satisfatório para toda faixa de interesse, o erro máximo do controlador corresponde a apenas 1.3% da máxima variação de temperatura na plataforma experimental.

A modelagem do módulo Peltier e a implementação do controlador de temperatura do tipo PID escalonado são consideradas satisfatórias para a caracterização das propriedades ópticas do  $\text{VO}_2$ . No entanto, outros conjuntos de modelos e estratégias de controle poderiam ser explorados para obter uma modelagem e um controle de temperatura mais preciso para o módulo Peltier.

Todos os resultados apresentados no capítulo 6 utilizaram o controle de temperatura baseado no controlador PID escalonado.

# Capítulo 6

## Resultados experimentais e modelagem do filme

Os resultados apresentados, neste capítulo, foram obtidos a partir da plataforma experimental descrita no capítulo 4 e são divididos em duas partes:

- caracterização óptica do filme e
- modelagem das propriedades ópticas.

Na primeira parte, apresentam-se os resultados referente à caracterização do filme de  $VO_2$ , onde destacam-se: os ciclos limites das características da transmitância e refletância, a sensibilidade térmica, as propriedades de remoção, congruência e o fenômeno de acomodação do filme de  $VO_2$ . Na segunda parte, apresentam-se os resultados obtidos para a modelagem do filme de dióxido de vanádio utilizando o modelo de Preisach e o modelo de aproximação ao limite adiabático.

Todos os testes experimentais foram realizados com a mesma taxa de variação de temperatura. A taxa de variação de  $5^\circ C/min$  foi utilizada como taxa padrão da variação de temperatura.

### 6.1 Caracterização óptica do filme

#### 6.1.1 Transmitância e Refletância

As Figuras 6.1(a) e 6.1(b) mostram o ciclo limite das curvas experimentais da transmitância *versus* temperatura e refletância *versus* temperatura do filme de  $VO_2$ , respectivamente. Essas curvas são obtidas a partir da variação cíclica da temperatura do filme entre  $20^\circ C -$

80°C – 20°C, de forma monotônica por partes. Os eixos verticais em *pu* (por unidade) representam as grandezas de transmitância e refletância óptica.

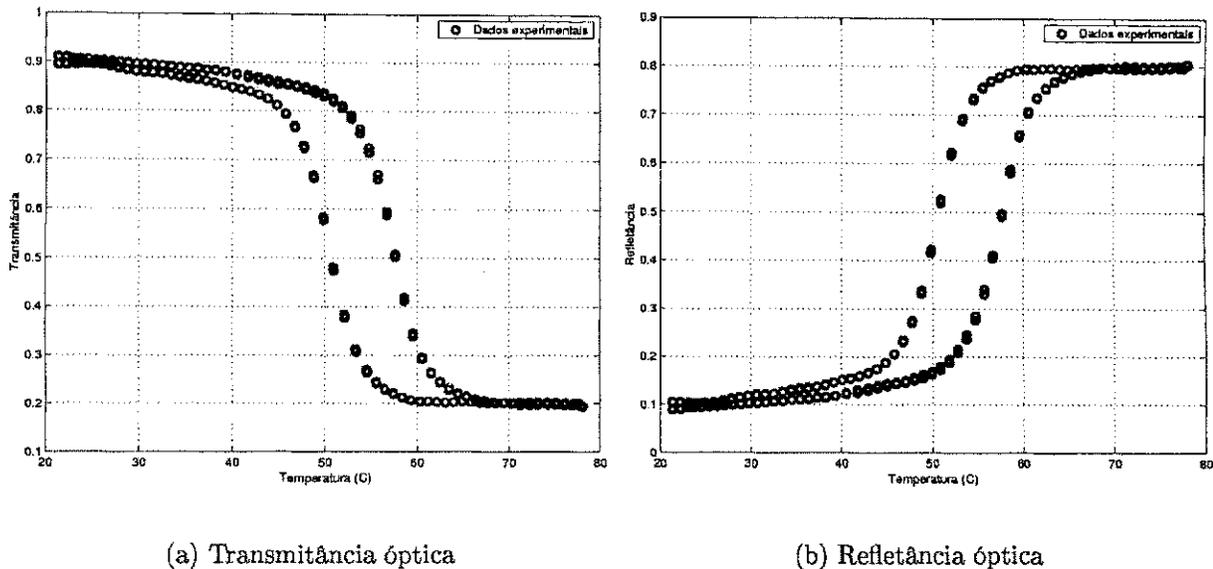


Figura 6.1: Verificação experimental das propriedades ópticas do filme de  $VO_2$

Observa-se como esperado que a transmitância e refletância óptica do filme de  $VO_2$  variam com a temperatura e exibem uma histerese. Também, é observado que a curva da transmitância, ver Figura 6.1(a), apresenta uma alta transmitância na fase semicondutora (temperaturas  $< 40^\circ C$ ) e uma baixa transmitância na fase metálica (temperaturas  $> 70^\circ C$ ). Para a refletância óptica ocorre o contrário, ver Figura 6.1(b), tem-se uma baixa refletância na fase semicondutora e uma alta refletância na fase metálica.

A Tabela 6.1 mostra o comportamento das propriedades de transmitância e refletância referente as Figuras 6.1(a) e 6.1(b) em termos da intensidade de luz incidente no filme de  $VO_2$ .

Propriedades	Baixa temperaturas	Altas temperaturas
Transmitância	90% da luz transmitida	20% da luz transmitida
Refletância	10% da luz refletida	80% da luz refletida

Tabela 6.1: Comportamento das propriedades de transmitância e refletância

Para as baixas temperatura, o filme de  $VO_2$  transmite 90% da luz incidente e apenas 10% da luz incidente é refletida. Para altas temperaturas, devido a mudança cristalográfica de

monoclínica para tetragonal do filme, o mesmo transmite apenas 20% da luz incidente e a luz restante, 80%, é refletida. Essa característica mostra que as propriedades da transmitância e refletância são complementares.

### 6.1.2 Sensibilidade Térmica

As Figuras 6.2(a) e 6.2(b) mostram as curvas de sensibilidade térmica das propriedades de transmitância *versus* temperatura e da refletância *versus* temperatura do filme de  $VO_2$ , respectivamente. A sensibilidade térmica das propriedade de transmitância e refletância foram obtidas a partir da definição na seção 1.3.5. É observado que as Figuras 6.2(a) e 6.2(b) apresentam duas curvas. Uma curva representa a elevação da temperatura de excitação ( $20^\circ C - 80^\circ C$ ) e a outra curva representa a diminuição da temperatura de excitação ( $80^\circ C - 20^\circ C$ ).

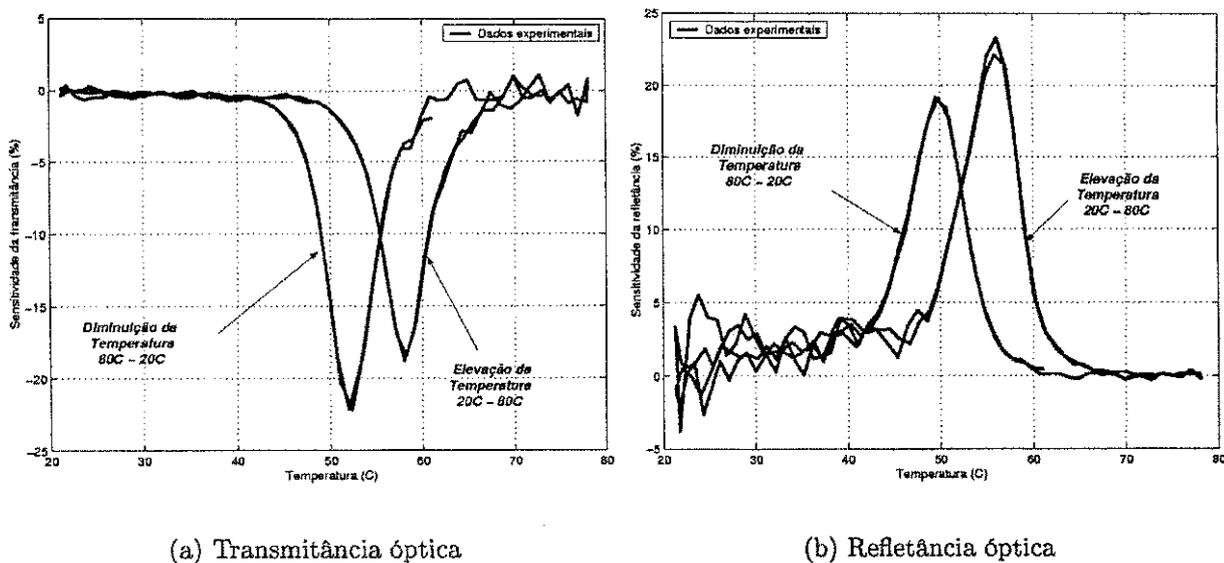


Figura 6.2: Sensibilidade das propriedades ópticas do filme de  $VO_2$

Observa-se que para as baixas e altas temperaturas a sensibilidade térmica é muito pequena e pode ser considerada nula. Para a região de transição, entre  $40^\circ C$  e  $70^\circ C$ , observa-se que a sensibilidade térmica da transmitância e da refletância óptica aumentam de forma considerável.

A Tabela 6.2 ilustra numericamente o comportamento da sensibilidade térmica da transmitância e refletância para as regiões de baixas temperatura, altas temperaturas e para a região de transição. Para a região de transição são apresentados os valores máximos

e mínimos para as Figuras 6.2(a) e 6.2(b), respectivamente.

Sensibilidade Térmica			
Propriedades	Temp. $\leq 40^{\circ}C$	Região de transição	Temp. $\geq 70^{\circ}C$
Transmitância	< 1%	-22.1% para a temperatura de $52.3^{\circ}C$ -18.7% para a temperatura de $58^{\circ}C$	< 1%
Refletância	< 1%	19% para a temperatura de $50^{\circ}C$ 23.3% para a temperatura de $56.1^{\circ}C$	< 1%

Tabela 6.2: Comportamento da sensibilidade térmica das propriedades de transmitância e refletância

A taxa média da variação da sensibilidade térmica na região de transição é em torno de  $2\%/^{\circ}C$  e pode ser considerada linear. A sensibilidade térmica da transmitância e da refletância, na região de transição, apresenta determinadas faixas em que seu valor é 20 vezes maior que nas regiões de baixas e altas temperaturas. Para a temperatura em torno de  $55^{\circ}C$  ocorre a maior variação do coeficiente térmico da transmitância e da refletância. Essa taxa de variação elevada na região de transição pode ser explorada em várias aplicações.

## 6.2 Propriedades do Modelo de Preisach

### 6.2.1 Propriedade de remoção

A Figura 6.3 mostra a temperatura de excitação utilizada na caracterização da propriedade de remoção das características ópticas do filme de  $VO_2$ .

Essa temperatura de excitação é constituída por um sinal triangular monotônico por partes que oscila entre  $20^{\circ}C$  a  $80^{\circ}C$  de forma decrescente com uma taxa de variação de  $5^{\circ}C/min$ .

As Figuras 6.4(a) e 6.4(b) mostram as curvas experimentais da propriedade de remoção da transmitância e da refletância óptica do filme de  $VO_2$ , respectivamente.

A propriedade de remoção foi verificada utilizando a variação temporal de temperatura cuja forma é apresentada na Figura 6.3. Nos pontos " $T_a$ ", " $T_b$ ", " $T_c$ " e " $T_d$ " ocorrem reversões na taxa de variação da temperatura de excitação que equivalem, no plano de fase da transmitância e refletância, aos pontos " $a$ ", " $b$ ", " $c$ " e " $d$ ", respectivamente. Nesse teste, há dois ciclos idênticos de variação da temperatura ( $T_aT_bT_cT_d; T_aT_bT_cT_d$ ), as curvas

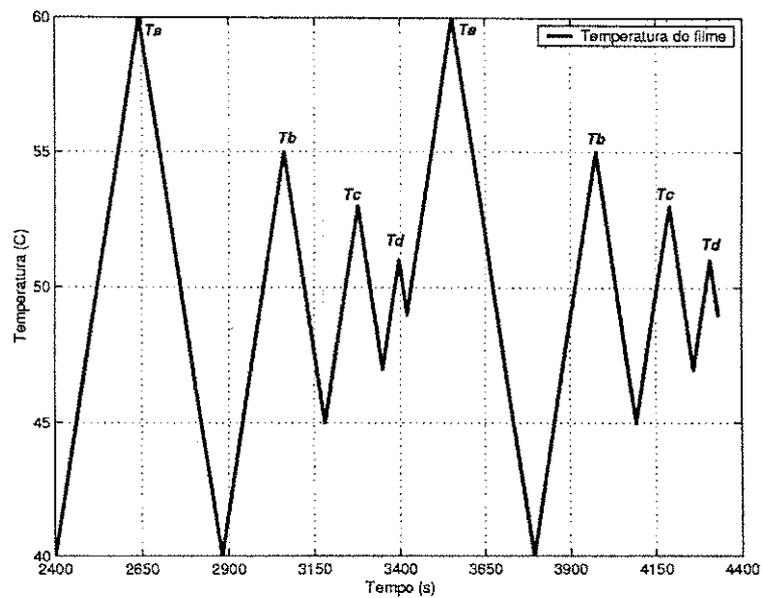
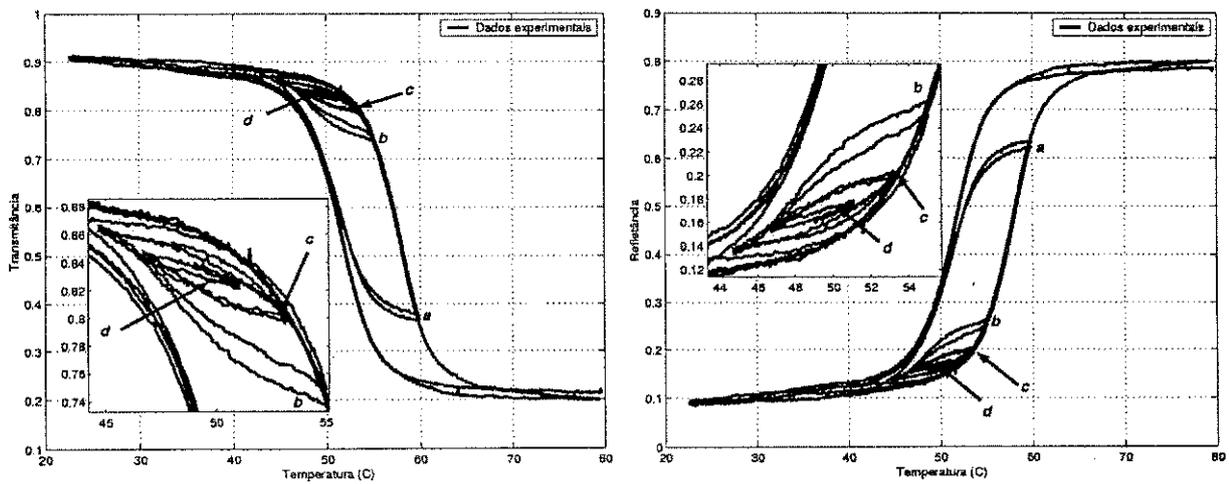


Figura 6.3: Temperatura de excitação para a propriedade de remoção



(a) Transmissão óptica

(b) Refletância óptica

Figura 6.4: Propriedade de remoção do filme de  $VO_2$

resultantes, no plano de fase, deveriam ser coincidentes. As propriedades de remoção da transmitância e refletância são confirmadas para toda faixa de excitação (ver Figuras 6.4(a) e 6.4(b) interior, respectivamente). Entretanto, como pode ser observado, isso ocorre de forma apenas aproximada.

A Tabela 6.3 mostra a diferença percentual entre os dois ciclos de variação da temperatura para os pontos de reversão "a", "b", "c" e "d" da propriedade de remoção da transmitância e refletância referente as Figuras 6.4(a) e 6.4(b).

Pontos de reversão	Variação Percentual (%)	
	Transmitância	Refletância
a	2.8	1.9
b	1.0	2.9
c	1.0	2.0
d	0.05	1.0

Tabela 6.3: Variação percentual da propriedade de remoção da transmitância e refletância

As diferenças percentuais da propriedade remoção da transmitância e refletância são inferiores a 3% para todo o ciclo de variação da temperatura. Essas diferenças não invalidam a comprovação da propriedade de remoção da transmitância e da refletância óptica do filme de  $VO_2$ .

### 6.2.2 Propriedade de congruência

A Figura 6.5 mostra a variação temporal da temperatura do filme utilizada na caracterização da propriedade de congruência das características ópticas do filme de  $VO_2$ . A temperatura de excitação é monotônica por partes.

A propriedade da congruência foi verificada utilizando uma temperatura de referência que promove o aparecimento de laços congruentes. Os segmentos de referência de temperatura "a" = "b", "c" = "d" e "e" = "f" são idênticos em termos da taxas de variação ( $5^\circ C/min$ ). O detalhe do segmento "a" (Fig. 6.5 interior) ilustra exatamente o trecho da temperatura de excitação que gera o laço congruente junto do ciclo limite. Esse trecho da temperatura de excitação é centrado sobre uma temperatura de referência ( $T_1$ ) e, também, é monotônico por partes.

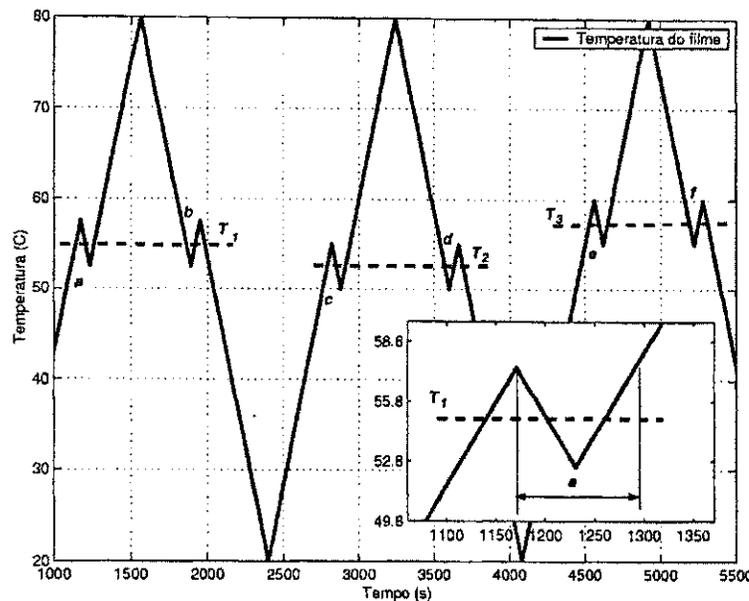


Figura 6.5: Temperatura de excitação para a propriedade da congruência

As Figuras 6.6(a) e 6.6(b) mostram as curvas experimentais da propriedade da congruência para a transmitância e para a refletância óptica do filme de  $VO_2$ , respectivamente.

Os laços de histerese resultantes da temperatura de excitação são deslocados verticalmente e deveriam ser congruentes, isto é: o laço correspondente ao segmento “a” e o laço correspondente ao segmento “b” deveriam ser idênticos em termos de suas formas e serem diferentes em termos do deslocamento vertical. Os laços experimentais da propriedade de congruência da transmitância e da refletância óptica são congruentes de forma aproximada.

A Tabela 6.4 mostra a diferença percentual entre os laços “a” e “b”, “c” e “d” e “e” e “f” da propriedade de congruência da transmitância e refletância referente as Figuras 6.6(a) e 6.6(b). A diferença percentual dos laços foi calculada a partir da altura e do comprimento de cada laço.

As diferenças percentuais da propriedade congruência da transmitância e refletância são elevadas. Pode-se observar, visivelmente, que os laços que deveriam ser congruentes são diferentes em todas as faixas de temperatura. Dessa forma, verifica-se que a propriedade de congruência do modelo de Preisach não é satisfeita. No entanto, espera-se que a modelagem das propriedades ópticas utilizando o modelo de Preisach, ver seção 6.4.1, não seja totalmente comprometida.

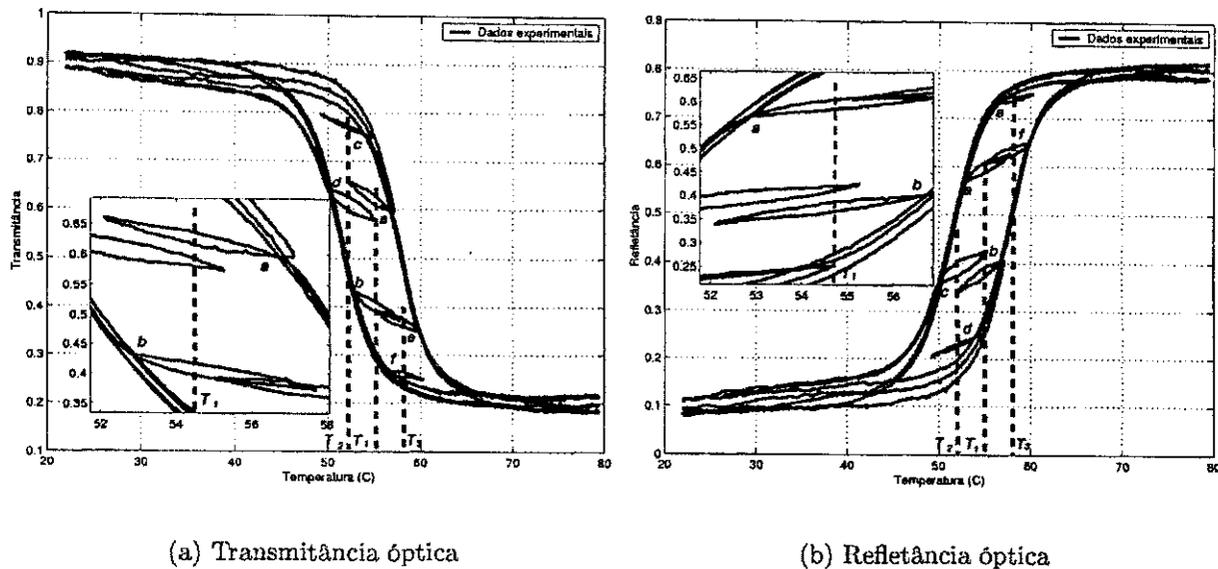


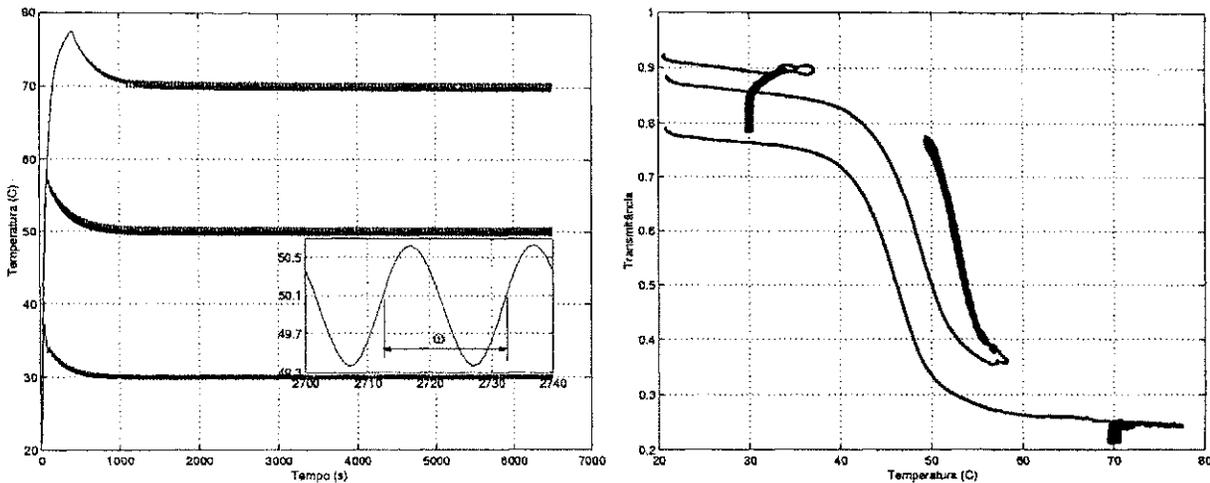
Figura 6.6: Propriedade de congruência do filme de  $VO_2$

Laços	Variação Percentual (%)	
	Transmitância	Refletância
"a" / "b"	30.0	40
"c" / "d"	200.0	220.0
"e" / "f"	150.0	80.0

Tabela 6.4: Variação percentual da propriedade de congruência da transmitância e refletância

### 6.3 Fenômeno de acomodação do filme

As Figuras 6.7(a) e 6.7(b) mostram as curvas de temperatura de excitação e do fenômeno de acomodação do filme de  $VO_2$ , respectivamente. O sinal de referência utilizado para a temperatura de excitação é um sinal senoidal de amplitude  $0.5^\circ C$  e frequência  $0.05 Hz$  sobreposto aos valores de temperatura constantes de  $30, 50$  e  $70^\circ C$ .



(a) Temperatura de excitação

(b) Transmittância óptica

Figura 6.7: Fenômeno de acomodação do filme de  $VO_2$  (excitação = senoidal)

Observa-se que o fenômeno de acomodação do filme de  $VO_2$ , ver Figura 6.7(b), é instável. Essa característica é indicada pelo deslocamento vertical das medições da transmitância óptica no plano de fase. A Tabela 6.5 mostra a variação percentual do fenômeno de acomodação da transmitância óptica devido a temperatura de excitação.

Temperatura ( $^\circ C$ )	Acomodação (%)
$30 + 0.5 \sin(0.05t)$	-14.8
$50 + 0.5 \sin(0.05t)$	54.8
$70 + 0.5 \sin(0.05t)$	-16.3

Tabela 6.5: Variação percentual do fenômeno de acomodação do filme de  $VO_2$  (excitação = senoidal)

O fenômeno de acomodação pode possuir origem estática, inerente da histerese óptica

do filme, simultaneamente com origem dinâmica, devido a dinâmica da temperatura de excitação. A região de transição de fase é mais susceptível ao processo de acomodação. Nessa região, encontra-se as maiores variações do fenômeno de acomodação do filme de  $VO_2$ .

As Figuras 6.8(a) e 6.8(b) mostram os detalhes das curvas de temperatura de excitação e do fenômeno de acomodação do filme de  $VO_2$  para a temperatura de referência de  $30^\circ C$ , respectivamente.

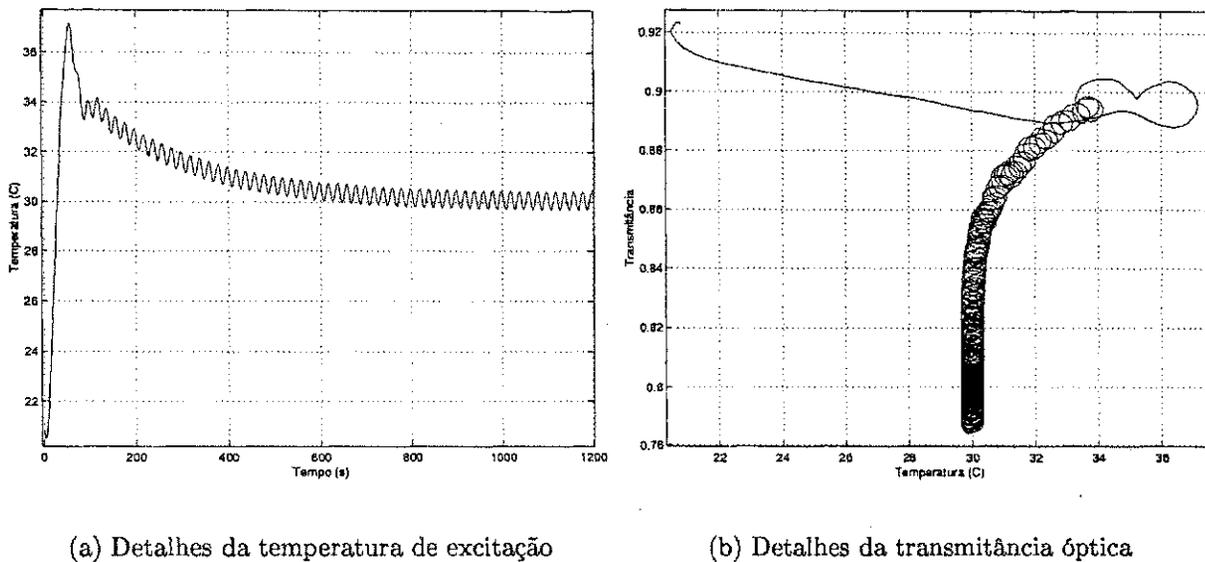


Figura 6.8: Detalhes do fenômeno de acomodação do filme de  $VO_2$

Para a temperatura de  $30^\circ C$ , o fenômeno de acomodação da transmitância varia 14.8% do valor da transmitância inicial. Essa variação, no plano de fase, assume uma forma espiral devido a oscilação senoidal sobreposta a temperatura de referência.

O fenômeno de acomodação do filme, também, foi verificado para uma temperatura de excitação constante adicionada a um ruído pseudo-aleatório. As Figuras 6.9(a) e 6.9(b) mostram as curvas da temperatura de excitação e do fenômeno de acomodação do filme de  $VO_2$ , respectivamente. O ruído pseudo-aleatório,  $N(média, variancia)$ , utilizado (ver Figura 6.9(a) interior) apresenta média e variancia variada, ver Tabela 6.6, para todas as temperaturas de excitação.

O filme de  $VO_2$ , novamente, apresentou um deslocamento vertical no plano de fase devido ao fenômeno de acomodação. É observado (ver Figura 6.9(b) interior) que o perfil do deslocamento se aproximada de um espiral, neste caso distorcida. A Tabela 6.6 mostra a variação percentual do fenômeno acomodação da transmitância óptica devido a

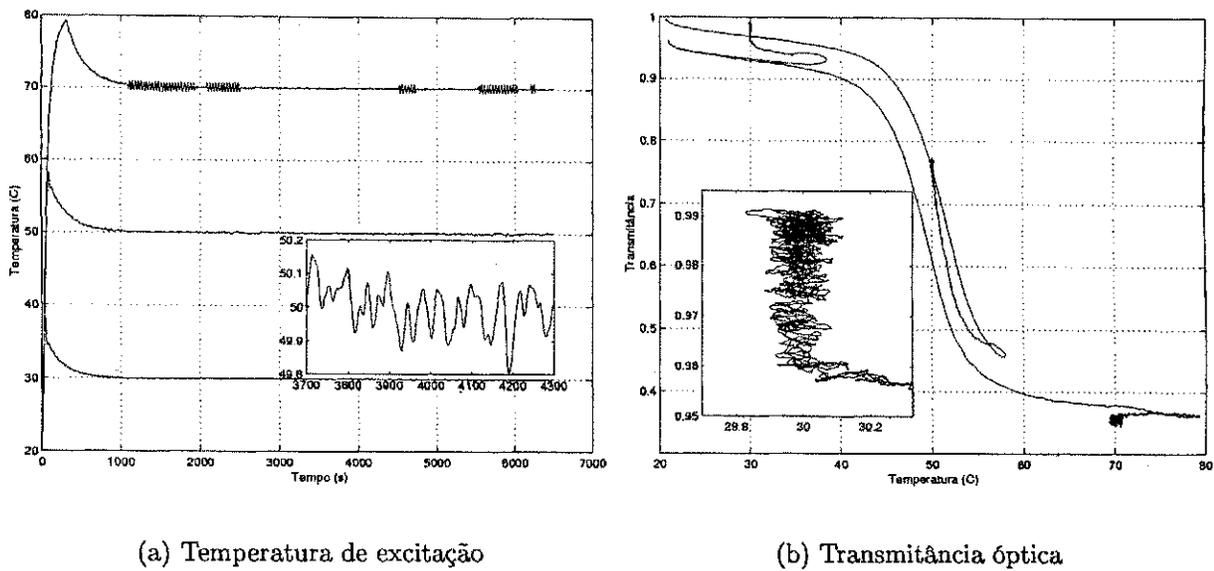


Figura 6.9: Fenômeno de acomodação do filme de  $VO_2$  (excitação = ruído pseudo-aleatório) temperatura de excitação constante adicionada a um ruído pseudo-aleatório.

Temperatura ( $^{\circ}C$ )	Acomodação (%)
$30 + N(-0.008, 0.001)$	6.4
$50 + N(0.009, 0.005)$	62.5
$70 + N(0.012, 0.073)$	-4.9

Tabela 6.6: Variação percentual do fenômeno de acomodação do filme de  $VO_2$  (excitação = ruído pseudo-aleatório)

Para as regiões de baixas e altas temperaturas o fenômeno de acomodação varia em torno de 5% e para a região de transição o fenômeno de acomodação é consideravelmente maior em torno de 62% da transmitância inicial. Essa característica mostra, novamente, que a região de transição é mais susceptível ao processo de acomodação.

De modo geral, as características do processo de acomodação óptica do filme de  $VO_2$  independente da excitação, é natural esperar que a estrutura cristalográfica do filme apresente mudanças ao longo do tempo quando submetida a uma temperatura constante.

O fenômeno de acomodação não é contemplado na modelagem das propriedades ópticas do filme de  $VO_2$  apresentada no capítulo 3. Este fenômeno deve ser, ainda, melhor explorado e modelado para as propriedades ópticas do filme de  $VO_2$ .

## 6.4 Modelagem das propriedades ópticas

A modelagem das propriedades ópticas do filme de  $VO_2$  deve permitir a descrição completa do fenômeno da histerese óptica. O modelo de Preisach modificado (ver seção 3.2) e o modelo de aproximação ao limite adiabático modificado (ver seção 3.3) são modelos matemáticos propícios para descrever as características do fenômeno da transmitância e da refletância óptica do filme de  $VO_2$ .

Na seção 6.2 é mostrado que as propriedades de remoção e congruência são verificadas e que o teorema da representação é satisfeito. Dessa forma, o modelo de Preisach modificado pode ser implementado para a modelagem das características de transmitância e de refletância óptica utilizando o procedimento proposto na seção 3.2.

Na seção 6.1 é mostrado que as propriedades ópticas apresentam um ciclo limite. Essa condição é suficiente para a implementação do modelo de aproximação ao limite adiabático modificado como foi mostrado na seção 3.3.

Nas próximas seções apresentam-se os resultados obtidos utilizando o modelo de Preisach modificado e o modelo de aproximação ao limite adiabático modificado.

### 6.4.1 Modelo de Preisach modificado

A Figura 6.10 mostra a temperatura de excitação para gerar o ciclo limite da histerese e as curvas decrescentes de primeira ordem.

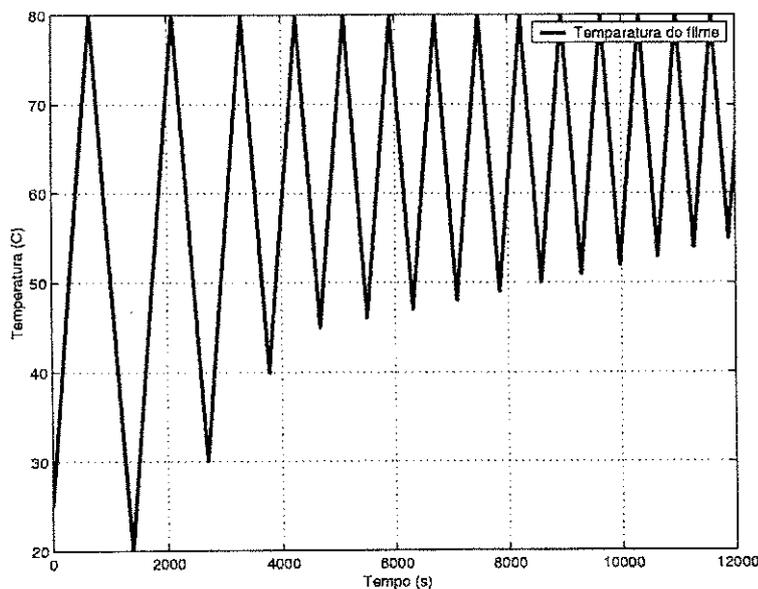


Figura 6.10: Temperatura de excitação para gerar a histerese com FODs

A temperatura de excitação apresenta taxa de variação de  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , é monotônica por partes e decrescente na saturação inferior. Essa temperatura de referência gera o aparecimento de laços de histerese interno ao laço principal.

As Figuras 6.11(a) e 6.11(b) mostram as curvas experimentais e as obtidas pelo modelo de Preisach modificado para a transmitância e a refletância óptica do filme de  $\text{VO}_2$ , respectivamente.

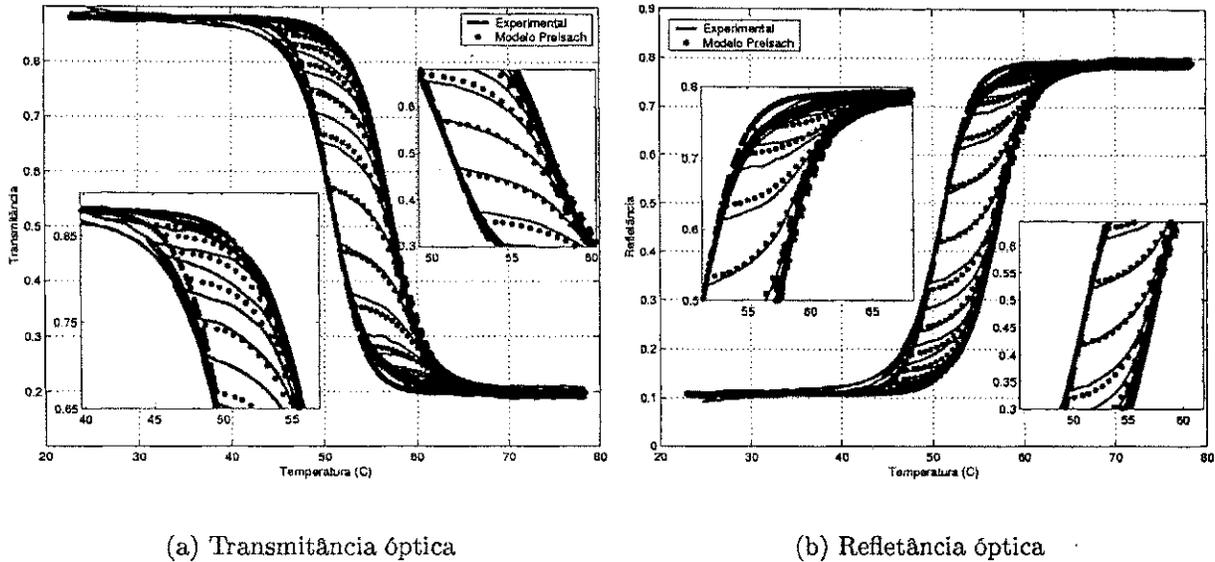


Figura 6.11: Verificação experimental das propriedades ópticas do filme de  $\text{VO}_2$

Observa-se que o modelo de Preisach modificado representa de forma bastante satisfatória as propriedades ópticas de transmitância e refletância do filme de  $\text{VO}_2$ . Contudo, é constatado que a plataforma experimental está submetida a perturbações que são evidenciadas nas medições próximo às saturações inferior (temperaturas  $< 40^{\circ}\text{C}$ ) e superior (temperaturas  $> 60^{\circ}\text{C}$ ). Essas perturbações impossibilitam a descrição completa (ver Figura 6.11(a) e 6.11(b) interior) do fenômeno da histerese para as temperaturas de saturação. No entanto, para a região de transição o modelo representa, de forma precisa, o fenômeno da histerese óptica.

A abordagem de identificação de parâmetros para as FODs desenvolvida por Sena *et al.* [45] é utilizada para obter os parâmetros das equações 3.15 a 3.18 da seção 3.2.2. A identificação dos parâmetros utiliza os dados experimentais das FODs e um processo de otimização não-linear multidimensional baseado em algoritmos genéticos. Os parâmetros identificados são:

$$p = [0.25, 0.25, -0.29, -51.5, 0.25, 0.25, -0.29, -51.5, \dots \\ -0.25, 0.0, 0.0, 0.0, -104.0, -47.0, 0.11, -68.0]^T$$

as funções que define a função das curvas decrescentes de primeira ordem são:

$$o(T_\alpha) = 0.25 + 0.25 \tanh \{-0.29 [T_\alpha - 51.5]\} \quad (6.1)$$

$$h(T_\alpha) = 0.25 + 0.25 \tanh \{-0.29 [T_\alpha - 51.5]\} \quad (6.2)$$

$$j(T_\alpha) = -0.25 e \quad (6.3)$$

$$g(T_\alpha) = -104.0 - 47.0 \tanh \{0.11 [T_\alpha - 68.0]\} \quad (6.4)$$

Esses funções, também, são utilizadas para a modelagem das propriedades de remoção e congruência do filme de  $VO_2$ . A Figura 6.12 ilustra a superfície que representa todas as curvas decrescentes de primeira ordem. Essa superfície foi obtida a partir da variação das temperaturas  $T_\alpha$  e  $T_\beta$  na equação que descreve as funções decrescente de primeira ordem, ver equação (3.14).

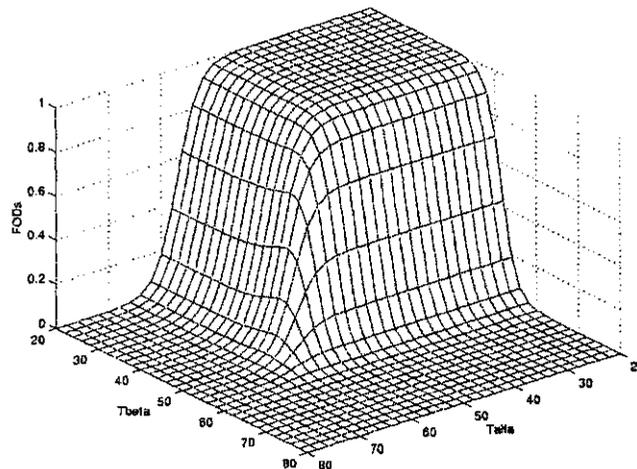


Figura 6.12: Superfície das curvas decrescente de primeira ordem

Observa-se que a superfície que representa as curvas decrescentes de primeira ordem apresenta duas região planas independentes da variação da temperatura. Para qualquer variação de temperatura menor que  $40^\circ C$ , o valor da função é máximo e para qualquer variação de temperatura maior que  $60^\circ C$  o valor da função é mínimo. No entanto, para variações de temperatura entre  $40^\circ C$  e  $60^\circ C$  o valor da função pode assumir qualquer valor entre o máximo e mínimo da função.

As Figuras 6.13(a), 6.13(b), 6.13(c) e 6.13(d) mostram as curvas experimentais e as curvas obtidas pelo modelo de Preisach modificado para a propriedade de remoção e congruência da transmitância e refletância óptica do filme de  $VO_2$ , respectivamente.

De modo geral, a implementação do modelo de Preisach contempla apenas parcialmente o teorema da representação. As diferenças entre a modelagem e os dados experimentais podem ser atribuída, principalmente para a propriedade de congruência, a limitações na implementação numérica do modelo e ao controle preciso da temperatura da plataforma. Um pequeno atraso no controle da temperatura pode provocar grandes variações no plano de fase e prejudicar o desempenho do modelo. A concordância das curvas de simulação com as curvas experimentais não é boa em algumas regiões do plano de fase. Entretanto, as discrepâncias não invalidam a caracterização e podem ser atribuídas, também, às perturbações eletromagnéticas e termodinâmicas que não foram modeladas nem compensadas neste trabalho.

#### 6.4.2 Modelo aproximação ao limite adiabático modificado

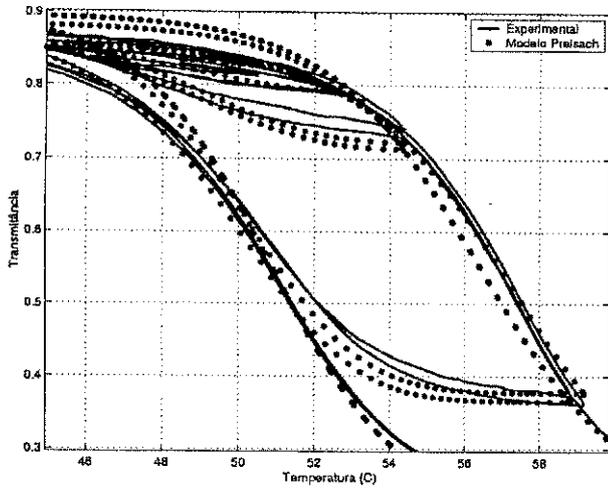
As Figuras 6.14(a) e 6.14(b) mostram as curvas experimentais e as curvas de simulação obtidas pelo modelo aproximação ao limite adiabático modificado da transmitância e refletância óptica do filme de  $VO_2$ , respectivamente.

O modelo de aproximação ao limite adiabático modificado representa de forma satisfatória as propriedades ópticas de transmitância e refletância do filme de  $VO_2$ . Através de uma análise visual pode-se observar que esse modelo, ao contrário do modelo de Preisach modificado, não representa de forma precisa a região de transição. Essa característica mostra que o modelo de aproximação ao limite adiabático é mais susceptível as perturbações dos dados experimentais que o modelo de Preisach.

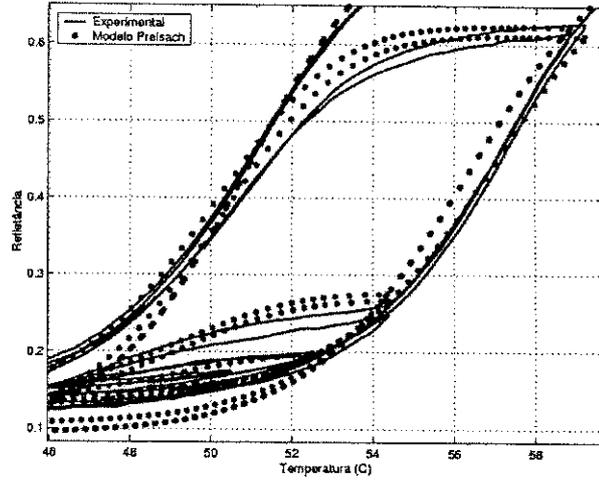
Os parâmetros ( $P_0, P_s, T_c, h_0, \omega$  e  $\zeta$ ) utilizados para implementar o modelo de aproximação ao limite adiabático, ver seção 3.3.1, são:

$$P_0 = 0.17, P_s = 0.75, T_c = 54.4, h_0 = 0.44, \omega = 6.6 \text{ e } \zeta = 0.92.$$

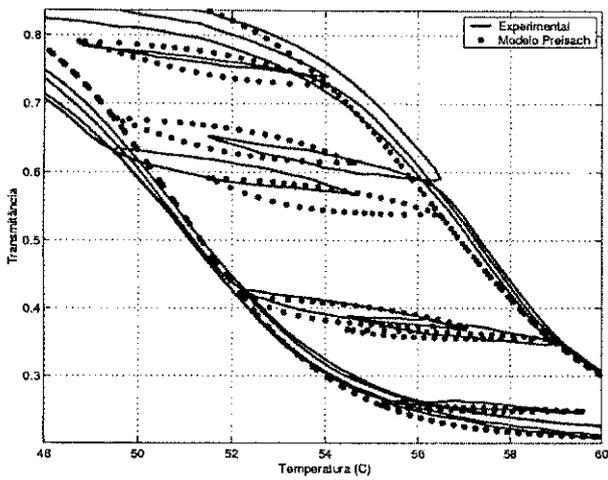
Esses parâmetros são utilizados para a modelagem das propriedades de remoção e congruência do filme de  $VO_2$ . As Figuras 6.15(a), 6.15(b), 6.15(c) e 6.15(d) mostram as curvas experimentais e as obtidas utilizando o modelo de aproximação ao limite adiabático modificado para a propriedade de remoção e congruência para a transmitância e para refletância óptica do filme de  $VO_2$ , respectivamente.



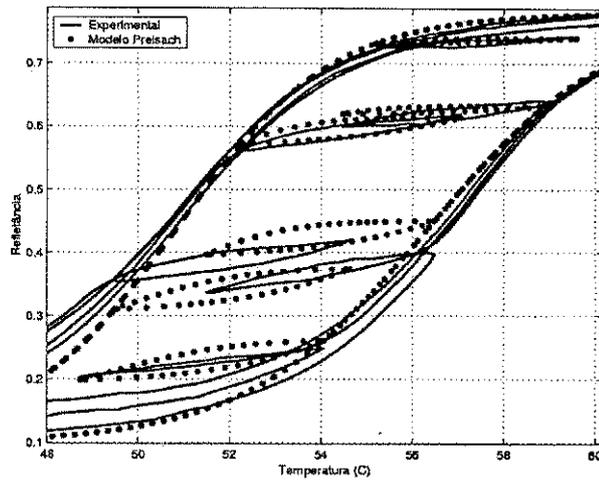
(a) Propriedade da remoção - transmitância



(b) Propriedade da remoção - refletância

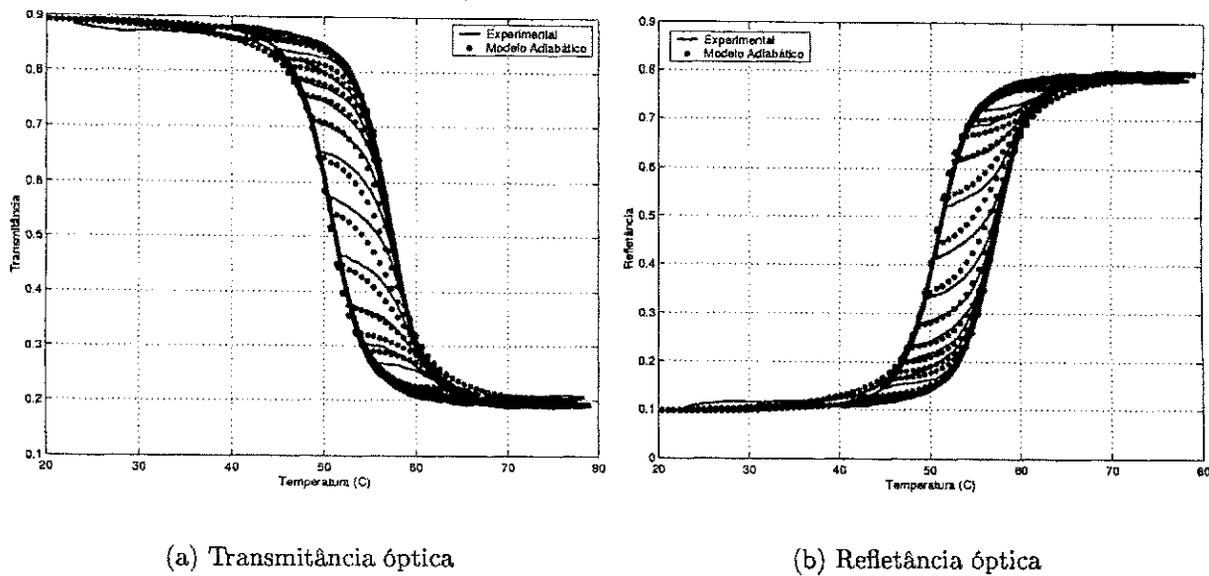


(c) Propriedade da congruência - transmitância



(d) Propriedade da congruência - refletância

Figura 6.13: Modelagem das propriedades de remoção e congruência do filme de  $VO_2$  (Modelo de Preisach)



(a) Transmitância óptica

(b) Refletância óptica

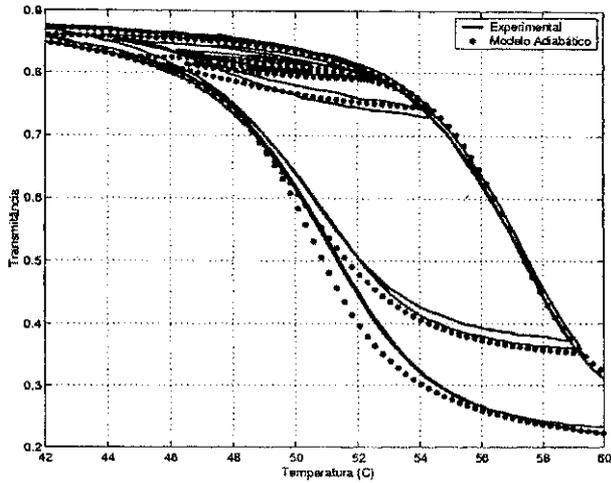
Figura 6.14: Verificação experimental e modelagem das propriedades ópticas do filme de  $VO_2$

É mostrado que o modelo de aproximação ao limite adiabático modificado é capaz de representar de forma aproximada as propriedades de remoção e congruência da transmitância e da refletância óptica do filme de  $VO_2$ . As discrepâncias entre os dados experimentais e os resultados do modelo são admissíveis, pois o modelo de aproximação ao limite adiabático não requer que as propriedades de remoção e congruência esteja presente ao fenômeno da histerese para que o modelo seja implementável.

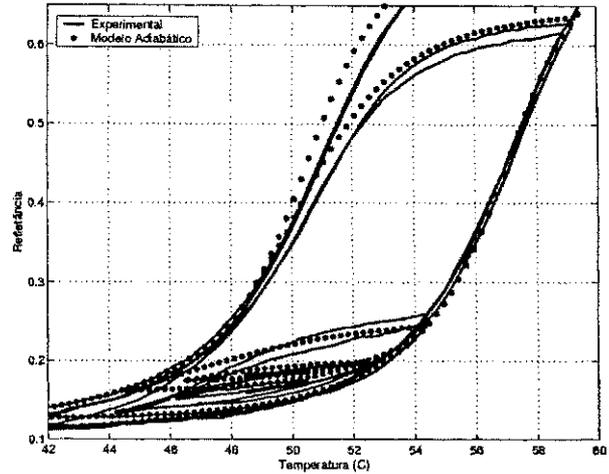
## 6.5 Conclusões

A caracterização óptica da transmitância e da refletância mostra que essas propriedades variam com a temperatura e exibem uma histerese. Nesse caso, as histereses da transmitância e da refletância são complementares devido a absorção do filme ser muito pequena.

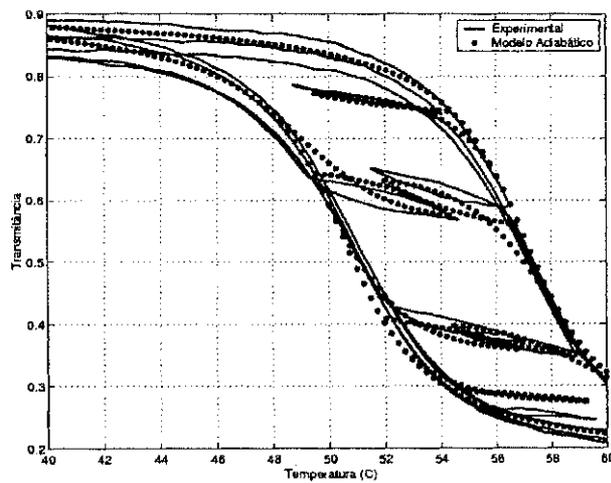
A propriedade de remoção é verificada apenas parcialmente e a propriedade de congruência não é satisfeita para a transmitância e refletância óptica do filme de  $VO_2$ . A dificuldade de caracterização da propriedade de remoção e congruência pode ser associada às perturbações eletromagnéticas e termodinâmicas presentes na plataforma experimental. No entanto, verificou-se que o modelo de Preisach é capaz de representar a histerese óptica de forma aproximada mesmo quando o teorema da representação não é totalmente satisfeito.



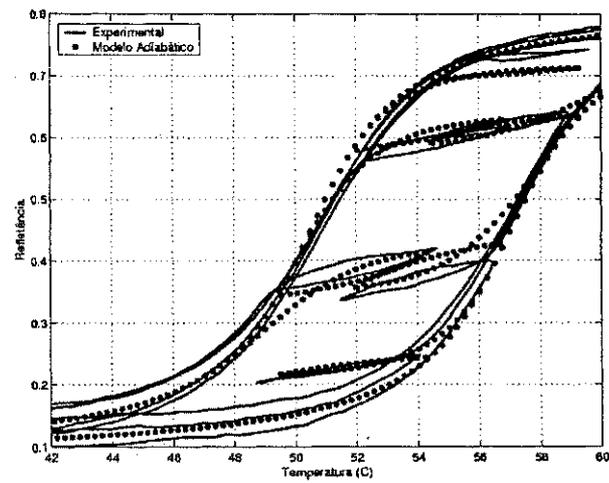
(a) Propriedade da remoção - transmitância



(b) Propriedade da remoção - refletância



(c) Propriedade da congruência - transmitância



(d) Propriedade da congruência - refletância

Figura 6.15: Modelagem das propriedades de remoção e congruência do filme de  $VO_2$  (Modelo de aproximação ao limite adiabático modificado)

O fenômeno de acomodação foi verificado para a propriedade de transmitância óptica do filme de  $VO_2$ . Para os dois casos testados, o filme apresentou deslocamentos verticais no plano de fase caracterizando a existência do fenômeno de acomodação. O processo de acomodação é mais acentuado na região de transição de fase devido a mudança de monoclinica para tetragonal na estrutura cristalográfica do filme de  $VO_2$ .

O modelo de Preisach modificado e o modelo de aproximação ao limite adiabático modificado representam de forma satisfatória as características ópticas do filme de  $VO_2$  e suas propriedades. As diferenças entre os resultados experimentais e os obtidos pelos modelos podem, em parte, ser designada as perturbações não modeladas na plataforma experimental.

# Capítulo 7

## Conclusões

Neste trabalho desenvolveu-se um estudo detalhado das propriedades ópticas dos sensores de filmes fino de  $VO_2$ . As propriedades de transmitância e refletância foram minuciosamente analisadas e comentadas, destacam-se a dependência do filme com a temperatura na forma de uma histerese, as propriedades de congruência e remoção e o fenômeno de acomodação do filme de  $VO_2$ .

O modelo de Preisach foi adaptado para representar a histerese característica das propriedades ópticas. Para a utilização do modelo de Preisach foi redefinido o operador elementar de Preisach, o triângulo de Preisach e a escolha de uma função de distribuição. Para realizar a caracterização das propriedades ópticas utilizando o modelo de Preisach modificado, foi utilizando o procedimento que emprega as curvas decrescentes de primeira ordem obtidas experimentalmente, para isso foi necessário considerar que a histerese óptica é simétrica e que satisfaz ao teorema da representação. No entanto, foi verificado que o modelo de Preisach pode descrever a histerese óptica mesmo que o teorema da representação não seja totalmente satisfeito.

Para a utilização do modelo de aproximação ao limite adiabático foi modificado o ciclo de equilíbrio adiabático e a função inversa do ciclo de equilíbrio adiabático. A caracterização das propriedades ópticas com o modelo de aproximação ao limite adiabático se resume na implementação de uma equação algébrica recursiva.

Uma plataforma experimental foi desenvolvida para caracterizar as propriedades de transmitância e refletância óptica do filme de  $VO_2$ . O fenômeno da histerese óptica do filme de  $VO_2$  foi obtido utilizando um sistema de aquisição de dados e controle que possibilitou o uso de estratégias de controle em tempo real. Um controlador de temperatura do tipo PID escalonado foi implementado digitalmente e foi capaz de variar e controlar a temperatura de forma satisfatória entre  $20^\circ C$  a  $80^\circ C$ . No entanto, não foi possível elimi-

nar as perturbações eletromagnéticas e termodinâmicas que estão presentes na plataforma experimental prejudicando diretamente na qualidade dos dados experimentais.

Este trabalho mostrou que é possível utilizar o modelo de Preisach e o modelo de aproximação ao limite adiabático para representar a histerese óptica de sensores de filme fino de  $VO_2$ . Os resultados obtidos indicam que a caracterização da histerese só foi obtida de forma aproximada. A discrepância entre os resultados do modelo pode ser, em parte, atribuída, às limitações da montagem experimental. Entretanto, o problema da representação de histereses é um problema aberto para o qual há poucas soluções propostas. Desse modo, os resultados obtidos neste trabalho, ainda que aproximados, representam um avanço significativo na modelagem das propriedades ópticas de sensores de filme fino de dióxido de vanádio.

### Sugestões para outros trabalhos de pesquisa

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

- Identificar e eliminar os problemas que impedem a caracterização das propriedades de remoção e congruência do modelo de Preisach;
- Estudar o comportamento da auto-reorganização e fenômeno de acomodação da estrutura cristálográfica para as propriedades ópticas do filme de  $VO_2$ ;
- Verificar a adaptação de um controlador para operação sobre qualquer ponto da histerese óptica do filme de dióxido de vanádio.

Na área de controle e identificação de sistemas, pode-se propor alguns trabalhos para serem desenvolvidos, destaca-se:

- Identificar novos modelos para o módulo Peltier e;
- Estudar e implementar estratégias de controle para o módulo Peltier.

# Bibliografia

- [1] Advantech. *PCL-812PG - Enhanced multi-lab Card - user's manual*. Advantech Corporation, Taiwan, first edition, 1996.
- [2] Aerotecnologia. *Novas tecnologias aplicadas á cabeça do rotor*, 2000.
- [3] L. A. Aguirre. *Introdução à identificação de sistemas: técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais*. Ed. UFMG, 2000.
- [4] L. A. L. Almeida. *Investigação da histerese térmica em filmes finos de óxido de vanádio*, Novembro 1999. Relatório do Projeto de Pesquisa de Doutorado, UFPB, Campina Grande, Paraíba, Brasil.
- [5] L. A. L. Almeida, G. S. Deep, A. M. N. Lima, and M. Fontana. A optimum double correlated sampling technique for infrared radiation detection. In *Proceedings of the 18th IEEE Instrumentation and Measurement - Technology Conference - IMTC/2001*, pages 1117–1122, Budapest, Hungary, May, 2001.
- [6] L. A. L. Almeida, G. S. Deep, A. M. N. Lima, and H. Neff. A new magnetic hysteresis model based on the adiabatic limit approximation. *Submetido IEEE Transactions on Magnetism*.
- [7] L. A. L. Almeida, G. S. Deep, A. M. N. Lima, and H. Neff. A rate dependent hysteresis model: application to the metal-insulator phase transition in  $VO_2$ . *A publicar*.
- [8] L. A. L. Almeida, G. S. Deep, A. M. N. Lima, and H. Neff. Um modelo para histerese magnética baseado em sistemas dinâmicos adiabáticos. In *XIII Congresso Brasileiro de Automática*, pages 2270–2275, Florianópolis, S.C, Brasil, Setembro, 2000.
- [9] L. A. L. Almeida, G. S. Deep, A. M. N. Lima, H. Neff, and R. S. Freire. A hysteresis model for a vanadium oxide thermal radiation sensor. In *Proceedings of the 17th IEEE Instrumentation and Measurement - Technology Conference - IMTC/2000*, pages 1214–1219, Baltimore, Maryland, USA, May, 2000.

- [10] L. A. L. Almeida, G. S. Deep, A. M. N. Lima, H. Neff, and R. S. Freire. Representação da histerese em sensores de óxido de vanádio utilizando o modelo clássico de preisach. In *XIII Congresso Brasileiro de Automática*, pages 2276–2281, Florianópolis, S.C, Brasil, Setembro, 2000.
- [11] J. C. Auler. *Assistência ventilatória mecânica*. Editora Atheneu, São Paulo, SP, 1995.
- [12] M. Benmoussa, E. Ibnouelghazi, A. Bennouna, and E. L. Ameziane. Structural, electrical and optical properties of sputtered vanadium pentoxide thin films. *Thin Solid Films*, 265:22–28, 1995.
- [13] N. Berglund. *Adiabatic Dynamical Systems and Hysteresis*. PhD thesis, Institut de Physique Théorique, Switzerland, March 1998.
- [14] G. Bertotti. Hysteresis in magnetism. *IEEE Transactions on Magnetism*, 34(1):191, 1998. IEEE Magnetics Society Distinguished - Lecturers for 1998-1999.
- [15] F. Bêteille, L. Mazerolles, and J. Livage. Microstructure and metal-insulating transition of  $VO_2$  thin films. *Materials Research Bulletin*, 34(14/15):2177–2184, 1999.
- [16] I. L. Botto, M. B. Vassallo, E. J. Barran, and G. Minelli. Ir spectra of  $VO_2$  and  $V_2O_3$ . *Materials Chemistry and Physics*, 50:267–270, 1997.
- [17] H. S. Choi, J. S. Ahn, J. H. Jung, T. W. Noh, and D. H. Kim. Mid-infrared properties of a  $VO_2$  film near the metal-insulator transition. *Physical Review B*, 54(7):4621–4628, August 1996.
- [18] T. Christmann, B. Felde, W. Niessner, D. Schalch, and A. Scharmann. Thermochromic  $VO_2$  thin films studied by photoelectron spectroscopy. *Thin Solid Films*, 287:134–138, 1996.
- [19] J. A. Chávez, J. A. Ortega, J. Salazar, A. Turó, and M. J. García. Spice model of thermoelectric elements including thermal effects. In *Proceedings of the 17th IEEE Instrumentation and Measurement - Technology Conference - IMTC/2000*, pages 1019–1023, Baltimore, Maryland, USA, May, 2000.
- [20] M. P. de Almeida and U. M. S. Costa. Exemplo de histerese com um sistema de massa-mola. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 22(1):49–53, Março 2000.

- [21] M. A. S. Duarte and J. S. Andrade. Histerese da taxa de desemprego de equilíbrio - uma aplicação ao caso português, Março 2000. Faculdade de Economia - G. E. M. F. - Universidade de Coimbra.
- [22] E. . Energia. Exemplo da aplicação do método ao setor de veículos leves, Setembro-outubro 2000. ISSN 1518-2932.
- [23] M. Fontana, L. A. L. Almeida, A. M. N. Lima, and G. S. Deep. Caracterização e modelagem das propriedades ópticas de sensores de dióxido de vanádio. In *II Seminário Nacional de Controle e Automação - II SNCA*, pages 1–14, Salvador, Brasil, Julho, 2001.
- [24] J. Fraden. *AIP handbook of modern sensors: physics, designs and applications*. American Institute of Physics, New York, USA, 1993.
- [25] A. P. Gruzdeva, V. Y. Zerov, and O. P. Konovalova. Bolometric and noise properties of elements for uncooled ir arrays based on vanadium dioxide films. *Journal of Optical Technology*, 64(12):1110–1113, December 1997.
- [26] B. J. Huang, C. J. Chin, and C. L. Duang. A design method of thermoelectric cooler. *International Journal of Refrigeration*, 23:208–218, 2000.
- [27] B. J. Huang and C. L. Duang. System dynamic model and temperature control of a thermoelectric cooler. *International Journal of Refrigeration*, 23:197–207, 2000.
- [28] C. R. F. Jacome. Uso de conhecimento prévio na identificação de modelos polinomiais NARMAX, Dezembro 1996. Dissertação de Mestrado, UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.
- [29] H. Jerominek, F. Picard, and D. Vincent. Vanadium oxide films for optical switching and detection. *Optical Engineering*, 32(9):2092–2099, September 1993.
- [30] G. Kádár. Ferromagnetic hysteresis. *J. Appl. Phys.*, 61(8):4013–4015, 1987.
- [31] M. G. Krishna and A. K. Bhattacharya. Optical and structural properties of bias sputtered vanadium pentoxide thin films. *Vacuum*, 48(10):879–882, 1997.
- [32] A. M. N. Lima, G. S. Deep, L. A. L. de Almeida, H. Neff, and M. Fontana. A gain-scheduling pid-like controller for peltier-pased thermal hysteresis characterization platform. In *Proceedings of the 18th IEEE Instrumentation and Measurement - Technology Conference - IMTC/2001*, pages 919–924, Budapest, Hungary, May, 2001.

- [33] L. Ljung. *System identification. Theory for the user*. Prentice Hall PTR, Linkoping University, Sweden, second edition, 1999.
- [34] S. Lu, L. Hou, and F. Gan. Surface analysis and phase transition of gel-derived  $VO_2$  thin films. *Thin Solid Films*, 353:40–44, 1999.
- [35] I. Mayergoyz. *Mathematical models of hysteresis*. Springer-Verlag, 1991.
- [36] I. D. Mayergoyz. Mathematical models of hysteresis. *Physical Review Letters*, 56(15):1518–1521, 1986.
- [37] I. D. Mayergoyz. Mathematical models of hysteresis (invited). *IEEE Transactions on Magnetics*, Mag-22(5):603–608, 1986.
- [38] Melcor. *Frigichip - Thermoelectric coolers and accessories*. Melcor Corporation, first edition, 1999.
- [39] F. J. Morin. *Phys. Rev. Lett*, 3:34, 1959.
- [40] M. Nagashima and H. Wada. Near infrared optical properties of laser ablated  $VO_2$  thin films by ellipsometry. *Thin Solid Films*, 312:61–65, 1998.
- [41] K. Ogata. *Engenharia de controle moderno*. Prentice Hall do Brasil Ltda, Rio de Janeiro, Brasil, 1993.
- [42] J. M. R. Pereira. Teorias de persistência e histerese, Outubro 1996. Dissertação de Mestrado, ISEG, Porto, Portugal.
- [43] F. Preisach. *Phys*, 94:277, 1935.
- [44] J. A. S. Sena. Adaptação do modelo de preisach para histereses assimétricas: Aplicação ao caso do  $VO_2$ , Março 2001. Dissertação de Mestrado, UFPB, Campina Grande, Paraíba, Brasil.
- [45] J. A. S. Sena, G. S. Deep, L. A. L. Almeida, R. C. S. Freire, and A. M. N. Lima. Modelagem de histerese magnética utilizando algoritmos genéticos. In *Congresso Brasileiro de Magnetismos - CBMag 2000*, pages 100–106, Natal, Brasil, 2000.
- [46] Texas. *TSL250, TSL251, TSL252 light-to-voltage optical sensors*. Texas Instruments, Dallas, Texas, USA, first edition, 1995.

- [47] F. Vajda and E. D. Torre. Efficient numerical implementation of complete-moving-hysteresis models (invited). *IEEE Transactions on Magnetism*, 29(2):1532–1537, 1993.
- [48] J. C. Valmalette and J. R. Gavarrí. High efficiency thermochromic  $VO_2(r)$  resulting from the irreversible transformation of  $VO_2(b)$ . *Materials Science and Engineering B*, 54:168–173, 1998.
- [49] A. Visintin. *Differential models of hysteresis*. Springer-Verlag, 1994.
- [50] F. Volklein, G. Min, and D. M. Rowe. Modelling of a microelectromechanical thermoelectric cooler. *Sensors and Actuators*, 75:95–101, 1999.
- [51] V. Y. Zerov, Y. V. Kulikov, V. N. Leonov, V. G. Malyarov, I. A. Khrebtov, and I. I. Shaganov. Features of operation of the bolometer based on vanadium dioxide film at the temperature region including phase transition. S.I Vavilov State Optical Institute, St. Petersburg, Russia 199034.