

C-2

Rogério Lara Leite

**Uma contribuição ao estudo e desenvolvimento de sensores
de alta tensão baseados em fibras ópticas**

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica.

Orientador: Prof. Dr. José Antonio Siqueira Dias

Campinas, SP
Outubro de 2006

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por: Rogério Lara Leite
e aprovada pela Comissão Julgada em 23/10/2006
J. A. Siqueira Dias
Orientador

BIBLIOTECA CENTRAL
CÉSAR LATTES
DESENVOLVIMENTO DE
COLEÇÃO
UNICAMP

UNIDADE	BC
Nº CHAMADA	T/UNICAMP
	L536c
V	EX
TOMBO BC/	71007
PROC.	16.123-06
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	4,00
DATA	20/12/06
BIBID	395060

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

L536c Leite, Rogério Lara
Uma contribuição ao estudo e desenvolvimento de sensores de alta tensão baseados em fibras ópticas/ Rogério Lara Leite. – Campinas, SP: [s.n.], 2006.

Orientador: José Antonio Siqueira Dias.
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas,
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Ótica de fibras. 2. Fibras ópticas. 3. Detectores óticos.
4. Sensoriamento remoto. 5. Eletrônica - Instrumentos.
I. Dias, José Antonio Siqueira. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título

Título em Inglês: A contribution to the study and development of high voltage fiber optics sensors
Palavras-chave em Inglês: Fiber optics sensors, High voltage sensors, Bragg gratings, Instrumentation and measurement, Remote sensing, Electronics instrumentation
Área de concentração: Eletrônica, microeletrônica e optoeletrônica
Titulação: Doutor em Engenharia Elétrica
Banca Examinadora: Elnatan Chagas Ferreira, José Antonio Donizete Rossi, Marco Antonio Robert Alves, Nobuo Oki e Yuzo Iano
Data da defesa: 23/10/2006

Rogério Lara Leite

Uma contribuição ao estudo e desenvolvimento de sensores de alta tensão baseados em fibras ópticas

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Eletrônica, microeletrônica e optoeletrônica.

Data: 23/10/2006

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Elnatan Chagas Ferreira - UNICAMP

Dr. José Antonio Donizete Rossi - FCPqD

Prof. Dr. José Antonio Siqueira Dias - UNICAMP

Prof. Dr. Marco Antonio R. Alves - UNICAMP

Prof. Dr. Nobuo Oki - UNESP

Prof. Dr. Yuzo Iano - UNICAMP

Campinas, SP
2006

BIBLIOTECA CENTRAL
CÉSAR LATTES
DESENVOLVIMENTO DE
COLEÇÃO
UNICAMP

0690722

Resumo

Os sensores a fibra óptica são especialmente indicados para operarem em ambientes eletricamente ruidosos, uma vez que são imunes aos efeitos da interferência eletromagnética (EMI) encontrados nestes ambientes. Tal característica faz com que os sensores ópticos sejam altamente vantajosos para as aplicações nos sistemas de sensoreamento utilizados pelas empresas de energia elétrica.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um protótipo de baixo custo de um sensor óptico de alta tensão com alta confiabilidade, que pode ser usado para monitorar o estado ou limites de tensão em uma rede elétrica.

Uma técnica de detecção do sinal através do sensoreamento com grades de Bragg é apresentada, fabricada e avaliada. Os resultados mostram que a técnica de detecção empregada, onde a amplitude ac do sinal da luz refletido é medida em um fotodiodo, mostra-se adequada para a aplicação em sensores de alta tensão. As medidas realizadas em um protótipo de sensor de alta tensão com fibra óptica com grade de Bragg indicam que o esquema de detecção desenvolvido é promissor, e pode ser usado para medir outros sinais dinâmicos que respondam a um esforço de pequena amplitude aplicado à fibra óptica. O protótipo desenvolvido permitiu a detecção de tensões variando na faixa de 143 V – 60 kV.

É também apresentada uma nova técnica para estabilizar termicamente grades de Bragg com a temperatura, utilizando o sinal uma fibra extra, casada com a fibra do sensor, que através de um circuito de realimentação atua no elemento aquecedor/resfriador do laser semiconductor (*thermo electrical cooler*), para fazer com que o comprimento de onda do laser siga as variações da sintonia da grade de Bragg sensora, causadas por variações da temperatura.

Esta técnica inovadora poderá ser utilizada para a compensação térmica de outros tipos de sensores com grade de Bragg, permitindo a fabricação de sensores de baixo custo e grande simplicidade de implementação.

Palavras-chave: Sensor óptico de tensão, Grade de Bragg, Sensores Ópticos, Instrumentação Eletrônica.

Abstract

Fiber optics sensors are specially indicated to operate in noisy electrical environments because they are immune to the effects of electromagnetic interference (EMI) found in these environments. Such characteristic makes these sensors highly advantageous to the applications in the measurement systems used by electrical energy companies.

This work presents the development of a prototype of a high-voltage and a low cost optical sensor which is used to monitor the state or voltage threshold with a high reliability. A technique for the detection of fiber Bragg grating sensors signals was developed, presented and tested.

The experimental results showed that the developed detection technique, where the ac amplitude of the signal result from the light reflection is measured with a photodiode is adequate for high voltage sensing applications. The prototype of the high voltage fiber Bragg sensor was tested and the measured results indicate that the technique can be used to detect any other dynamic measurand which induces a small strain amplitude when applied to the fiber Bragg grating. The developed prototype detected voltages in the range from 143 V to 60 kV.

It is also presented a new technique for obtaining temperature independent fiber Bragg gratings, using a feedback circuit which uses the signal detected from a matched fiber and generates a signal which actuates on the thermo electrical cooler of the semiconductor laser, modifying the laser's output wavelength, in order to accurately track the Bragg wavelength shifts caused by temperature variations.

This novel technique can be used for the fabrication of simple and low-cost temperature compensated fiber Bragg grating sensors.

Keywords: Voltage optical sensor, Bragg gratings, Optical sensors, Electronics instrumentation.

Agradecimentos

A Deus pela oportunidade.

Ao meu orientador Prof. Dr José Antônio Siqueira Dias, do DEMIC/FEEC/UNICAMP, pela orientação.

Ao Prof. Dr Elnatan Chagas Ferreira, do DEMIC/FEEC/UNICAMP, pela ajuda no projeto do circuito de transimpedância.

Aos amigos da Fundação CPqD João Batista de Mello Ayres Neto, Cláudio Antônio Hortêncio, Eduardo Ferreira Costa, Flávio Eduardo Nalin, Flávio Borin, Danilo Cesar Dini e Paulo José Pereira Curado sem os quais este trabalho não teria sido realizado.

A minha família pelo apoio durante esta jornada.

À Fundação CPqD pelo apoio recebido para realização deste trabalho.

A Isoladores Santana pelas amostras de isoladores.

À Bandeirante Energia S/A pela sua colaboração no programa de pesquisa e desenvolvimento da ANEEL.

*À minha esposa Maria Isabel
Às minhas filhas Helena e Júlia*

Sumário

Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xvii
Glossário	xix
Lista de Símbolos	xix
Trabalhos Publicados Pelo Autor	xxi
1 Sensores Ópticos	1
1.1 Introdução	1
1.2 Fibras Ópticas	2
1.2.1 Fibras ópticas para telecomunicações	2
1.2.2 Características	3
1.2.3 Tipos de fibras	6
1.2.4 Fibras monomodo	7
1.2.5 Fibras ópticas monomodo de dispersão normal (SM)	8
1.2.6 Fibras ópticas monomodo de dispersão deslocada (DS)	8
1.2.7 Fibras ópticas monomodo de dispersão deslocada e não-nula (NZD)	9
1.2.8 Fibras ópticas plásticas	9
1.3 Sensores a fibra óptica	10
1.3.1 Principais características	10
1.3.2 Tipos de sensores ópticos	11
1.3.3 Meios de sensoreamento	13
1.3.4 Sensoreamento pontual e distribuído	14
1.3.5 Sensor interferométrico Fabry-Perot	15
1.3.6 Sensor com grade de Bragg em fibra óptica	18
1.3.7 Construção da grade de Bragg	27
1.3.8 Sensores elétricos e magnéticos	29
1.3.9 Sensores de temperatura	30
1.3.10 Sensores disponíveis no mercado	30

2	Sensor óptico de alta tensão	33
2.1	Introdução	33
2.2	Desenvolvimento do sensor de tensão	33
2.2.1	Montagem do protótipo exploratório	34
2.2.2	Princípio de funcionamento	34
2.2.3	Resultados obtidos em laboratório	37
2.2.4	Protótipo do sensor de tensão para a rede de distribuição	38
2.2.5	Montagem do sensor	38
2.2.6	Instalação do sensor	40
3	Circuitos eletrônicos e testes	43
3.1	Introdução	43
3.2	Sistema de sensoriamento	44
3.3	Sinal de entrada	45
3.4	Primeira solução apresentada para o amplificador de transimpedância	45
3.5	Transimpedância com malha T	47
3.5.1	Resultados simulados	48
3.6	Filtro passa baixas de segunda ordem VCVS	52
3.6.1	Equações de projeto	53
3.6.2	Simulação do Filtro	53
3.7	Estágio de saída analógica	54
3.8	Circuito receptor completo	55
3.9	<i>Driver</i> de laser	55
3.10	Aquisição de dados	56
3.11	Processamento	57
3.12	Placa analógica	60
3.12.1	Metodologia utilizada para o desenvolvimento do firmware	62
3.12.2	<i>Average</i>	62
3.13	Placa digital	62
3.13.1	Interface do sistema analógico com o sistema digital	65
3.13.2	Temporização para a interface	66
3.14	Fonte de Alimentação	67
3.15	Empacotamento	67
4	Resultados experimentais	71
4.1	Testes em laboratório	71
4.2	Testes no Campo	72
4.2.1	Medidas realizadas com o sensor óptico	73
4.2.2	Influência da temperatura ambiente nos circuitos eletrônicos	75
4.2.3	Influência do circuito excitador do laser	76
4.2.4	Influência da temperatura no comprimento de onda do laser	77
4.2.5	Medições da variação da função de transferência da grade de Bragg com a temperatura	81

5	Análise e modelamento do sensor com grade de Bragg construído	85
5.1	Modelamento da Grade de Bragg construída	85
5.2	Proposta de uma solução para a operação da grade de Bragg de forma estável	87
5.2.1	Proposta de circuito para ajuste do ponto de operação ótimo para o sensor	92
5.2.2	Proposta de circuito para manutenção do ponto de operação ótimo para o sensor com a grade de Bragg variando com a temperatura	96
5.3	Projeto de um circuito analógico de polarização no ponto ótimo e compensação com temperatura	100
6	Conclusões	105
6.1	Conclusões	105
	Referências bibliográficas	107

Lista de Figuras

1.1	Atenuação óptica.	4
1.2	Dispersão intermodal em fibras multimodo índice gradual.	4
1.3	Dispersão cromática em fibras monomodo.	5
1.4	Dispersão em fibras monomodo.	5
1.5	Modo transmissivo.	12
1.6	Modo reflexivo.	12
1.7	Configuração de um sensor interferométrico FP extrínseco.	15
1.8	Variação da intensidade em função do deslocamento em torno do ponto Q.	17
1.9	Configuração de um sensor FP intrínseco.	18
1.10	Configuração de uma grade de Bragg ao longo de um segmento de fibra.	19
1.11	Configuração de uma grade de Bragg ao longo de um segmento de fibra.	20
1.12	Princípio de operação de um sistema de sensoreamento distribuído utilizando uma rede óptica com grades de Bragg ao longo da fibra.	23
1.13	Sensor óptico utilizando grade de Bragg em fibra medindo um parâmetro localizado em um ponto A.	24
1.14	Interferômetro de Michelson a fibra.	24
1.15	Sensor de Bragg a fibra montado para operar como Interferômetro de Michelson a fibra.	25
1.16	Divisão de λ por um acoplador WDM.	26
1.17	Sistema de sensoreamento usando acoplador WDM e dois receptores ópticos para sinal de referência.	27
1.18	Comparação das estruturas de FBG em fibra, a convencional com períodos Λ_{GB} e a de períodos longos.	28
2.1	Esquema de montagem do sensor.	34
2.2	Fotografia do sensor montado.	35
2.3	Espectro de Reflexão da FBG sem estar tensionada ou pressionada.	35
2.4	Espectros de reflexão da FBG quando o dispositivo sensor estiver submetido ao campo elétrico.	36
2.5	Espectros de reflexão da FBG e o nível de modulação resultante, com o dispositivo submetido ao campo elétrico, com a fonte operando em $\lambda = \lambda_Q$	36
2.6	Resultado das medições em laboratório.	37
2.7	Fotografia do sensor em ensaio de laboratório.	38
2.8	Diagrama esquemático do ensaio em laboratório.	39
2.9	Sensor de alta tensão encapsulado.	39

2.10	Bucha isoladora.	40
2.11	Detalhes da montagem do sensor de tensão.	41
2.12	Detalhes da instalação do sensor.	42
3.1	Sistema de sensoriamento.	44
3.2	Forma de onda do sinal de entrada.	45
3.3	Amplificador de transimpedância com mais um estágio amplificador.	46
3.4	Terceiro estágio de amplificador e filtro.	46
3.5	Primeira placa projetada para desenvolvimento do receptor.	47
3.6	Amplificador de transimpedância com malha T.	48
3.7	Protótipo do circuito de transimpedância.	49
3.8	Resultado do simulador para o circuito de transimpedância com malha T.	49
3.9	Resultado do simulador para o circuito de transimpedância com malha T em outra escala de frequências.	50
3.10	Forma de onda de saída do amplificador transimpedância.	51
3.11	Esquema do filtro.	52
3.12	Simulação do filtro.	54
3.13	Estágio de saída.	55
3.14	Circuito receptor completo.	56
3.15	Circuito eletrônico do driver de laser.	56
3.16	Circuito conversor analógico digital.	57
3.17	Circuito microcontrolador e conversor analógico digital.	58
3.18	Circuito eletrônico da placa analógica.	59
3.19	Diagrama esquemático da placa analógica.	60
3.20	Layout da placa analógica.	61
3.21	Fotografia da placa analógica.	61
3.22	Tela do sistema de desenvolvimento de firmware Keil.	62
3.23	Fluxograma do Average.	63
3.24	Layout da placa do PC104.	64
3.25	Fotografia da placa do PC104.	64
3.26	Diagrama de tempos dos sinais de controle do barramento de dados.	66
3.27	Diagrama esquemático da fonte de alimentação	67
3.28	Layout da fonte de alimentação	68
3.29	Fotografia da da fonte de alimentação	68
3.30	Diagrama de blocos da interconexão das placas sensor de tensão, módulo digital e fonte.	69
3.31	Fotografia do rack	69
4.1	Equipamento para gerar a alta tensão.	71
4.2	Forma de onda do sensor para 7,5KV.	72
4.3	Forma de onda do sensor para 190v.	73
4.4	Forma de onda medida com osciloscópio na rede elétrica de média tensão.	73
4.5	Bancada de teste dentro do <i>container</i>	74
4.6	Formas de ondas elétrica e óptica.	75
4.7	Gráfico de $P_O \times I_F$	77

4.8	Gráfico da variação do comprimento de onda em função da temperatura da junção do laser, $\lambda \times T_L$.	78
4.9	Função de transferência típica de uma grade de Bragg sintonizada em 1550 nm.	79
4.10	Circuito eletrônico do driver do laser.	80
4.11	Setup do ensaio de temperatura na grade de Bragg.	82
4.12	Reprodução da tela do analisador de espectro óptico - OSA.	82
5.1	Curvas de transferência da grade de Bragg a 20, 25 e 30 °C.	86
5.2	Gráfico do ganho em função da temperatura.	86
5.3	Ganho variando em função dos pontos de operação.	88
5.4	Diagrama de blocos do circuito tradicional com dupla grade de Bragg.	89
5.5	Tela do analisador de espectro óptico com as duas grades de Bragg selecionadas.	90
5.6	Resultado do teste elétrico com a dupla grade.	90
5.7	Resultado do teste térmico com a dupla grade.	91
5.8	Diagrama de blocos do circuito proposto para correção com temperatura do ponto de polarização ótimo.	92
5.9	Escolha de um ponto de operação.	93
5.10	Setup de medida de T em função de V_{TEMP} .	95
5.11	Resultado da medida de $\lambda \times V_{TEMP}$.	95
5.12	Gráfico calculado de $T \times V_{TEMP}$.	96
5.13	Gráfico calculado de $\lambda \times T$.	96
5.14	Resultado da medida em laboratório de $\lambda_{sint} \times T$.	97
5.15	Montagem de um sensor com dupla grade de Bragg.	98
5.16	Diagrama de blocos do sistema de estabilização de ponto de operação proposto.	98
5.17	Circuito proposto para estabilização de ponto de operação do sistema laser-grade de Bragg.	100
5.18	Circuito utilizado para simulação do circuito que modela o sistema óptico-térmico-elétrico do conjunto laser-grade de Bragg.	101
5.19	Resultado da aplicação de um pulso de perturbação (variação de R1) ao circuito, mostrando que o sistema se recupera do erro.	102
5.20	Circuito que modela o sistema óptico-térmico-elétrico do conjunto laser-grade de Bragg.	103

Lista de Tabelas

1.1	Atenuação da fibra óptica GI.	7
1.2	Atenuação da fibra óptica SM.	8
1.3	Atenuação da fibra óptica DS.	8
1.4	Atenuação da fibra óptica NZD.	9
1.5	Principais mensurandos quantificados com uso de sensores ópticos.	11
2.1	Tensões mais comuns utilizadas no sistema de energia brasileiro.	38
3.1	Tabela dos sinais de ligação ente a placa analógica e o PC 104	65
3.2	Condições do sinal NTEMDADO.	65
3.3	Sinais de comandos para seleção dos sensores	66
4.1	Variações observadas na saída analógica no primeiro protótipo do sensor, com os circuitos dentro de um <i>container</i> climatizado.	76
4.2	Medições realizadas com laser de potência e temperatura controlada.	81

Lista de Símbolos

<i>EMI</i>	- Interferência Eletromagnética
<i>SM</i>	- Fibra óptica monomodo de dispersão normal
<i>DS</i>	- Fibra óptica monomodo de dispersão deslocada
<i>NZD</i>	- Fibra óptica monomodo de dispersão deslocada e não-nula
λ	- Comprimento de onda
λ_B	- Comprimento de onda de Bragg
Λ	- Período da grade de Bragg
<i>nef</i>	- Índice de refração efetivo
<i>n</i>	- Índice de refração
β	- Coeficiente do efeito eletro-óptico
α	- Coeficiente do efeito eletro-óptico
ϵ	- Tensão axial
<i>TC</i>	- Transformador de corrente
<i>TP</i>	- Transformador de potencial
<i>OTDR</i>	- Optical Time Domain Reflectometer - Reflectômetro óptico no domínio do tempo
<i>OSA</i>	- Optical Spectrum Analyzer - Analisador de espectro óptico
<i>ASE</i>	- Fiber amplified spontaneous emitter
<i>LASER</i>	- Light Amplification by Stimulation of Radiation
<i>DFB</i>	- Distributed feedback LASER
<i>FBG</i>	- Fiber Bragg Grating - Grade de Bragg em Fibra
<i>FP</i>	- Fabry-Perot

Trabalhos Publicados Pelo Autor

1. PIRES, F.M.N., Marques, R. Bandeirante Energia S/A; Curado, P.J.P., Paradisi, A.P., Ayres, J.B., Borin, F., Leite, R.L., Dini, D.C., Hortêncio, C. A. e Nadalin, F.E., CPqD "Sensor de Alta Tensão à Fibra Óptica" *XVII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica*, Belo Horizonte, agosto de 2006.
2. DINI, D.C., ROSOLEM, J.B., LEITE, R.L., PRATA, H.S., MOBILON, E. URSO, J.E., SARMENTO, E.H.M. "Soluções inovadoras para a supervisão de redes ópticas de longo alcance e alta capilaridade" *Cadernos CPqD Tecnologia*, Campinas, V.1, n.1 p.205-213, 2005.
3. LEITE, R. L., ROSOLEM, J. B., PRATA, H. S. A., DINI, D. C., URSO, J. E., SARMENTO E.H.M. "Técnicas de Telecomando e Telealimentação via Fibra para Sistemas de Supervisão Óptica In Line" *11 SBMO - Simposio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica*. São Paulo, 2004.
4. ARAGÃO, B. J. G., LONGUI, E. C., LEITE, R. L., CURADO, P. J. P.-CPqD Telecom & IT Solutins. "A Mathematical model for creep estimation of OPGW Cables" *52nd IWCS/FOCUS, 2003*, Philadelphia Marriott, p.592-596, Proceedings, 2003.

Capítulo 1

Sensores Ópticos

1.1 Introdução

Este capítulo faz uma revisão das propriedades fundamentais dos diversos tipos de sensores a fibra óptica e de suas principais características. Os sensores a fibra óptica foram examinados sistematicamente, levando-se em conta critérios de desempenho, tais como resolução, faixa dinâmica, sensibilidade em ambientes com diversas perturbações, processo de demodulação, bem como as técnicas de desenvolvimento destes sensores.

A fibra óptica tem muitas características que a tornam apropriada para o uso como um sensor totalmente passivo. Um sensor passivo é aquele que não requer energia elétrica na região de sensoriamento. A principal vantagem das fibras ópticas é o fato de serem fabricadas de materiais dielétricos, como a sílica e plásticos. Isto possibilita que os sensores a fibra óptica sejam empregados em ambientes perigosos, onde a utilização de sensores elétricos convencionais não é adequada.

Os sensores a fibra óptica são especialmente indicados para operarem em ambientes que requerem isolamento elétrico, uma vez que são imunes aos efeitos da interferência eletromagnética (EMI) encontrados em ambientes eletricamente ruidosos. Tal característica faz com que os sensores ópticos sejam altamente vantajosos para as aplicações nos sistemas de sensoriamento utilizados pelas empresas de energia elétrica.

A supervisão da rede de distribuição e sub-transmissão de energia elétrica possibilitará o controle e detecção de degradações e falhas localizadas, permitindo controle e atuação mais rápida no reparo da rede, aumentando com isso, a qualidade do serviço prestado ao cliente.

O sensoriamento a fibra óptica é uma das áreas que tem obtido recentemente grandes progressos em função da disponibilidade tecnológica de novos dispositivos e componentes ópticos de fibra. Devido a seu tamanho, a fibra óptica permite a construção de sensores bem compactos e de baixo peso, além de possuir a capacidade de enviar/receber sinais ópticos em grandes distâncias. Isso possibilita

a construção de redes de sensores, sem eventualmente a necessidade da conversão óptica/elétrica em cada ponto de sensoriamento, tornando possível a redução de custos e aumentando a flexibilidade e confiabilidade da solução.

As grandezas monitoradas pelos sensores ópticos a fibra também podem ser transmitidas a centros de controle através de outros meios de comunicação, tais como rádio ou celular, com a utilização de interfaces dedicadas, apresentando dessa forma uma alternativa para os locais onde não existam enlaces de fibra óptica para transmissão dos dados monitorados.

Os principais métodos de sensoriamento foram investigados, sendo que as buscas bibliográficas e os estudos foram focados nas tecnologias mais promissoras, tais como sensores com Grade de Bragg em Fibra, e técnicas de medições desenvolvidas mais recentemente tal como Grades de Períodos Longos, além das técnicas interferométricas, especialmente os interferômetros de Fabry-Perot, em função de ser uma técnica muito utilizada para realização de sensoriamento a partir de um deslocamento mecânico.

1.2 Fibras Ópticas

Visando facilitar a compreensão dos fenômenos intrínsecos e da tecnologia de sensores a fibra óptica, é apresentado a seguir um resumo das principais características das fibras ópticas utilizadas em telecomunicações e fibras ópticas plásticas.

1.2.1 Fibras ópticas para telecomunicações

Desde que foram desenvolvidas, as fibras ópticas representaram uma revolução na forma de transmitir informações. A fibra óptica vem sendo utilizada para transmitir sinais de áudio, vídeo e dados por ondas de luz, pode ser descrita como fios finos e flexíveis, constituídos de vidro que, comparados com fios metálicos, apresenta inúmeras vantagens.

A composição básica da fibra óptica pode ser de materiais dielétricos, vidros, polímeros ou cristais. Possui uma estrutura cilíndrica, composta de uma região central, que é denominada núcleo (por onde a luz é guiada), e uma região periférica, denominada casca, que envolve completamente o núcleo.

Existem regiões do espectro óptico que são mais utilizadas para transmissão em fibras ópticas: 850 nm, 1310 nm e 1550 nm (chamadas respectivamente de 1^ª, 2^ª e 3^ª janela). Os sistemas ópticos atuais utilizam fonte de luz na região do infravermelho, pois a propagação de luz infravermelha na fibra óptica é mais eficiente do que a luz visível por sofrer menor atenuação.

1.2.2 Características

As características das fibras ópticas podem ser descritas essencialmente por suas propriedades quanto à atenuação e à dispersão dos sinais por elas transmitidos. A atenuação está diretamente associada às perdas na transmissão e o fenômeno de dispersão, por sua vez, permite caracterizar a capacidade de transmissão de uma fibra óptica, expressa pela taxa de transmissão (bits por segundo) ou pela banda passante (Hertz), respectivamente nos sistemas digitais ou analógicos (2).

Atenuação

À medida que a luz se propaga pela fibra óptica, perde parte da potência óptica por um processo que chamamos de atenuação do sinal, que é medido em dB/km. O efeito de atenuação na fibra depende do comprimento de onda da luz transmitida e do comprimento de fibra percorrido pela luz.

Os mecanismos básicos responsáveis pela atenuação em fibras ópticas são os seguintes:

- Absorção da luz por materiais dentro da fibra;
- Espalhamento Rayleigh da luz;
- Irregularidades mecânicas, intrínsecas e extrínsecas da fibra.

É importante observar que no dimensionamento de um sistema de transmissão, além das perdas introduzidas pela atenuação das fibras ópticas, também devem ser consideradas as perdas causadas por emendas e conexões entre segmentos de fibras e no acoplamento das fibras ópticas com fontes e detectores ópticos (2).

Na Figura 1.1 são apresentados valores de atenuação para os comprimentos de onda utilizados para transmissão em fibra multimodo.

Dispersão

A dispersão é o principal efeito responsável pela limitação da largura de banda do sinal transmitido. A dispersão causa uma distorção temporal em sinais digitais (que são os sinais mais comuns em fibras ópticas), o que resulta superposição de um sinal em instantes diferentes.

A dispersão é um efeito em que os modos de propagação gerados por uma frente de onda de luz são temporalmente separados quando trafegam através da fibra óptica, o que ocasiona diferença no tempo de chegada dos diversos modos ao atingirem a outra extremidade da fibra.

A dispersão total do pulso é composta pela soma quadrática da:

- Dispersão intermodal e da

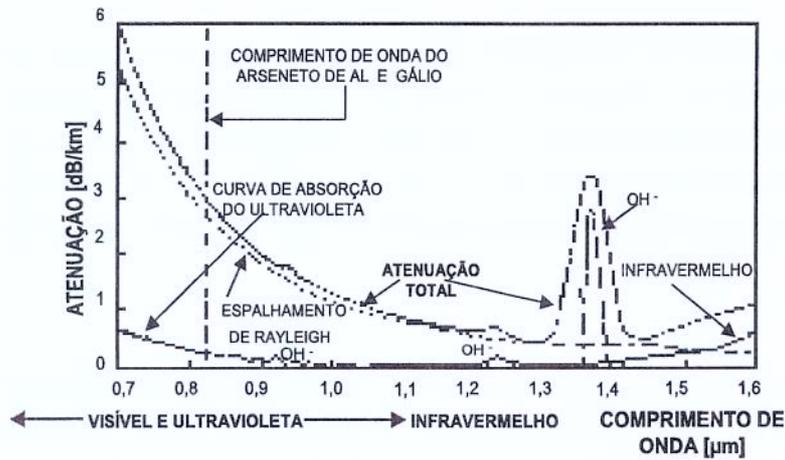


Fig. 1.1: Atenuação óptica.

- Dispersão intramodal.

A dispersão intermodal ou modal caracteriza-se por afetar a transmissão em fibras multimodo (Figura 1.2) e resulta do fato de cada modo de propagação, para um mesmo comprimento de onda, ter uma diferente velocidade (de grupo) de propagação (2).

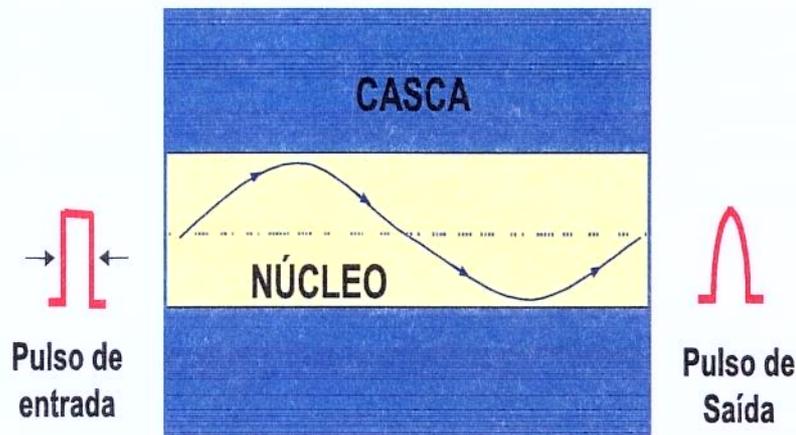


Fig. 1.2: Dispersão intermodal em fibras multimodo índice gradual.

A dispersão intramodal ou cromática é resultante da dependência da velocidade (de grupo) de propagação de um modo individual com relação ao comprimento de onda. O efeito deste tipo de dispersão, na distorção do sinal transmitido, aumenta com a largura espectral da fonte luminosa e com o comprimento da fibra (2). A Figura 1.3 ilustra essa condição.

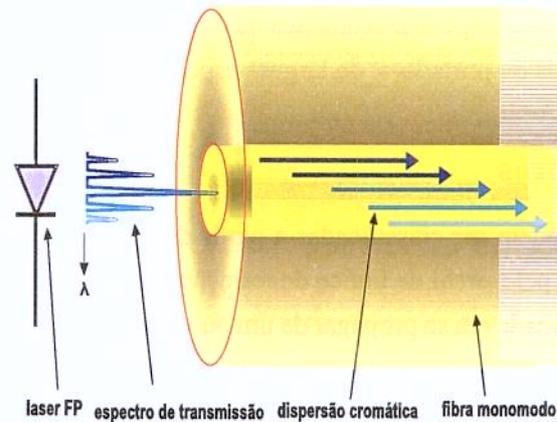


Fig. 1.3: Dispersão cromática em fibras monomodo.

Dispersão cromática é o efeito dominante em fibras monomodo e pode tornar-se nula em certas regiões do espectro óptico. A região do espectro em que a dispersão se minimiza depende do tipo de fibra monomodo. A Figura 1.4 ilustra as curvas da dispersão cromática das fibras ópticas monomodo de dispersão normal (SM), de dispersão deslocada (DS) e das fibras monomodo de dispersão não nula (NZD).

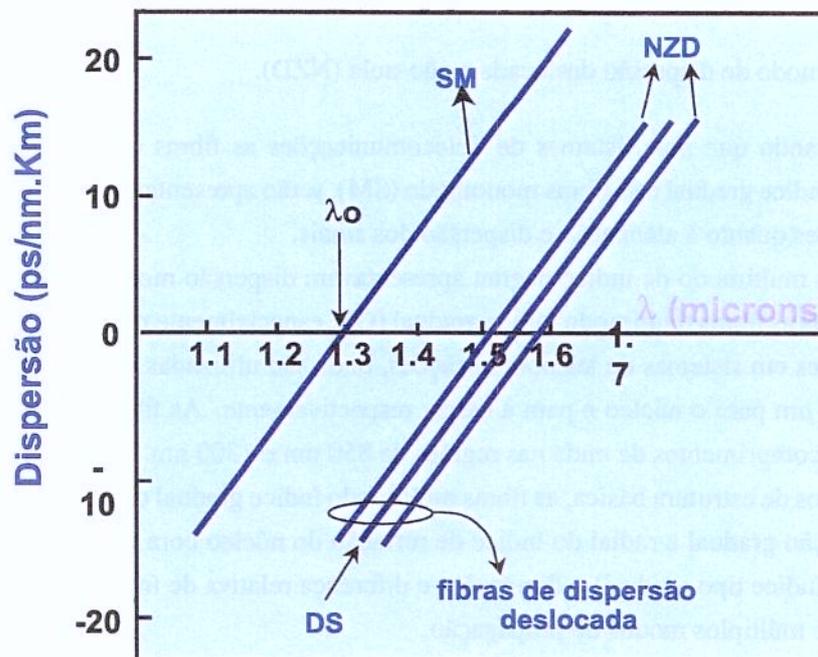


Fig. 1.4: Dispersão em fibras monomodo.

A presença do efeito da dispersão cromática na transmissão de sinal por fibra monomodo depende do comprimento de onda da portadora, da largura espectral da portadora e do comprimento da fibra.

1.2.3 Tipos de fibras

As fibras ópticas podem ser classificadas a partir de suas características básicas de transmissão, ditadas essencialmente pelo perfil de índice de refração e pela geometria do núcleo da fibra.

Vem daí a sua habilidade em se propagar de um ou vários modos na região de interesse, com implicações principalmente na capacidade de transmissão (banda passante) e nas facilidades operacionais em termos de conexões e acoplamento com fontes, detectores luminosos, da possibilidade de inserir amplificadores ópticos e do desempenho destes. Levando em consideração estas características, é normalmente utilizada uma classificação básica para as fibras, com os seguintes tipos:

- Multimodo índice degrau;
- Multimodo índice gradual;
- Monomodo de dispersão normal (SM);
- Monomodo de dispersão deslocada (DS);
- Monomodo de dispersão deslocada e não-nula (NZD).

Considerando que nos Sistemas de Telecomunicações as fibras ópticas mais utilizadas são as multimodo índice gradual e as fibras monomodo (SM), serão apresentadas a seguir suas características e propriedades quanto à atenuação e dispersão dos sinais.

As fibras multimodo de índice degrau apresentavam dispersão modal muito alta. Por isso foram desenvolvidas as fibras multimodo índice gradual (GI), especialmente para otimizar a dispersão modal nas aplicações em sistemas de telecomunicações, onde são utilizadas com dimensões de 50/125 μm ou 62,5/125 μm para o núcleo e para a casca, respectivamente. As fibras multimodo índice gradual operam nos comprimentos de onda nas regiões de 850 nm e 1300 nm.

Em termos de estrutura básica, as fibras multimodo índice gradual caracterizam-se essencialmente por: – variação gradual e radial do índice de refração do núcleo com relação à casca, dando origem ao perfil de índice tipo gradual; – dimensões e diferença relativa de índice de refração, implicando a existência de múltiplos modos de propagação.

Essa variação do índice de refração no núcleo em função do raio permite uma equalização na velocidade de propagação dos diferentes modos excitados, o que garante uma redução da distorção do sinal óptico. Na prática, essa variação gradual do índice faz com que os raios de luz percorram

trajetórias diferentes, com velocidades diferentes (pelo trajeto maior a luz viaja com maior velocidade, pelo trajeto menor a luz viaja com menor velocidade), e cheguem à outra extremidade da fibra com o mesmo atraso relativo, aumentando a banda passante e, conseqüentemente, a capacidade de transmissão da fibra óptica.

A fibra multimodo índice gradual, conforme a ABNT-NBR13487 (3), deve ser classificada de acordo com a atenuação óptica medida, como mostra a Tabela 1.1.

Diâmetro do núcleo [μm]	Comprimento de onda [nm]	Classe	Atenuação máxima [dB/km]
50	850	A	2,5
		B	3,0
	1300	A	0,6
		B	1,0
62,5	850	A	2,8
		B	3,0
	1300	A	0,7
		B	2,0

Tab. 1.1: Atenuação da fibra óptica GI.

1.2.4 Fibras monomodo

As fibras monomodo operam com um único modo de propagação, ou seja, os raios de luz percorrem o interior da fibra por um mesmo caminho. Também diferem das fibras multimodo pela variação radial do índice de refração do núcleo em relação à casca, e podem ser classificadas como fibra de dispersão normal (standard), de dispersão deslocada (dispersion shifted) e de dispersão deslocada não-nula (non-zero dispersion).

Quando comparadas com as fibras ópticas do tipo multimodo as fibras monomodo possuem maior capacidade de transmissão e núcleos com dimensões menores, diâmetros inferiores a $10\mu\text{m}$. Por possuírem núcleo com dimensões menores que as fibras multimodo, as fibras monomodo exigem o uso de dispositivos e de técnicas de alta precisão, para a realização de conexões entre segmentos de fibras e do acoplamento da fibra com as fontes e detectores ópticos.

Contudo, as características destas fibras são superiores às das multimodos, principalmente no que diz respeito à banda passante, mais larga, o que aumenta a capacidade de transmissão. Apresentam atenuação menor, aumentando, com isto a distância de transmissão sem o uso de repetidores. Por essa razão são as mais utilizadas em entroncamentos de ligações telefônicas de longa distância, além de possibilitarem a inserção de amplificadores ópticos ao longo dos trajetos.

Nas fibras multimodo a potência óptica que trafega é confinada quase que inteiramente no núcleo da fibra, enquanto que, nas fibras monomodo, uma quantidade significativa da potência óptica se propaga através da casca da fibra.

1.2.5 Fibras ópticas monomodo de dispersão normal (SM)

As fibras ópticas monomodo de dispersão normal caracterizam-se por apresentarem dispersão cromática igual a zero em um comprimento de onda em torno de 1310, definido como o λ_0 , comprimento de onda de dispersão nula, mas possuem uma alta dispersão cromática, em torno de 18,0 ps/nm.km, na região de 1550 nm. Estão especificadas na ABNT-NBR13488 (4), e no ITU-T G.652.

Segundo a ABNT-NBR13488 a fibra óptica monomodo de dispersão normal deve ser classificada conforme é apresentado na Tabela 1.2.

Comprimento de onda 1310[nm]		Comprimento de onda 1550[nm]	
Classe	Atenuação máxima [dB/km]	Classe Y	Atenuação máxima [dB/km]
A	0,34	A	0,20
B	0,36	B	0,22
C	0,40	C	0,24
D	> 0,40	D	>0,24

Tab. 1.2: Atenuação da fibra óptica SM.

1.2.6 Fibras ópticas monomodo de dispersão deslocada (DS)

As fibras ópticas monomodo de dispersão deslocada são as que possuem comprimento de onda de dispersão zero (λ_0) em 1550 nm. Estão especificadas na ABNT-NBR13602 (5) e no ITU-T G.653. Segundo a ABNT-NBR13602, a classificação das fibras monomodo de dispersão deslocada deve estar de acordo com a Tabela 1.3.

Classe	Atenuação máxima em 1550 nm [dB/km]
A	0,21
B	0,23
C	0,25
D	> 0,25

Tab. 1.3: Atenuação da fibra óptica DS.

1.2.7 Fibras ópticas monomodo de dispersão deslocada e não-nula (NZD)

Estas fibras ópticas também são conhecidas como fibras monomodo de dispersão não zero em 1550 nm, com λ_0 na região próxima a 1550 nm, entre 1530 nm e 1565 nm. Apresentam um valor baixo de dispersão, mas maior que zero em valor absoluto, na região de 1550 nm, tipicamente em torno de 0,06 ps/nm.km. Estão especificadas na ABNT-NBR13604 (6) e no ITU-T G.655. Segundo a ABNT-NBR13604, a classificação das fibras monomodo de dispersão não zero deve estar de acordo com a Tabela 1.4.

Classe	Atenuação máxima em 1550 nm [dB/km]
A	0,21
B	0,23
C	0,25
D	> 0,25

Tab. 1.4: Atenuação da fibra óptica NZD.

1.2.8 Fibras ópticas plásticas

As fibras ópticas plásticas (POFs - Polymer Optical Fibers) são fabricadas com polímeros, que se constituem de materiais com longas cadeias moleculares de natureza orgânica que, em princípio, apresentam menor transparência óptica quando comparados com os vidros. Em função do grande avanço obtido no desenvolvimento das fibras ópticas de sílica (SiO_2) na década de 70 para aplicação em sistemas de telecomunicações, apesar das fibras ópticas poliméricas serem fabricadas desde a década de 60, elas ficaram restritas a aplicações em iluminação, decorações e em transmissão de imagens por feixes até meados da década de 90.

Atualmente as POFs têm sido consideradas como uma possibilidade para a execução dos últimos 100 metros das Redes de Área Locais (LANs), tendo em vista a robustez, facilidade e segurança para manipular. No caso específico de sistemas de sensoriamento as POFs podem ser utilizadas para conduzir a luz até a região de sensoriamento ou até mesmo como uma fibra sensora.

No Brasil pesquisas de sensores ópticos utilizando as POFs estão sendo conduzidas pelo Laboratório de Instrumentação e Fotônica (LIF) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UERJ). No momento os esforços estão voltados basicamente para os seguintes projetos: um sensor de alta tensão que se comunica com o potencial terra através de duas fibras óptica plásticas, um sensor de gases anestésicos que usa a POF como elemento sensor e um projeto de detecção bacteriana que irá utilizar a POF como elemento sensor qualitativo e quantitativo de bactérias (7).

1.3 Sensores a fibra óptica

Um sensor a fibra óptica pode ser definido como um meio através do qual a luz guiada por uma fibra pode ser modificada em resposta a uma influência externa física, química, biológica, etc.

1.3.1 Principais características

Geralmente os sensores a fibra óptica são de tamanho relativamente reduzido, podem ser facilmente configurados numa grande variedade de formas, apresentam baixo peso e volume, são quimicamente passivos e podem ser facilmente integrados aos circuitos já existentes de fibras ópticas para comunicação. Estes sensores permitem a multiplexação e transmissão das informações por longas distâncias (8), dando origem a uma rede, de sensores distribuídos, que pode ser usada para monitorar vários pontos simultaneamente.

Convém frisar que a compactação dos sensores é genérica e um tanto relativa, especialmente no caso dos sensores elétricos, a compactação depende da ordem de grandeza da tensão a ser medida. Portanto, um sensor desenvolvido para medir 500 kV é de grande porte e fisicamente maior que um sensor desenvolvido para medir 127 V.

A pesquisa e o desenvolvimento no campo do sensoreamento óptico foram fortemente motivados pelas vantagens significativas que os sensores ópticos apresentam quando comparados aos tipos convencionais de sensores, nos termos de suas propriedades. São apresentas, a seguir, algumas das vantagens em relação aos sensores não ópticos.

- Grande sensibilidade;
- Eletricamente passivo;
- Imune a Interferência Eletromagnética (EMI);
- Permite configuração pontual e distribuída;
- Capacidade de multiplexação;
- Fisicamente Compactos.

Tendo em vista as vantagens e a capacidade das fibras ópticas para transmitir sinais ópticos por longas distâncias, uma tendência atual é criar redes de sensores, ou arranjos onde os sensores são montados em série. Isso evita a necessidade de se fazer separadamente a conversão fotônica e a conversão eletrônica em cada local de sensoreamento, reduzindo assim os custos e aumentando a flexibilidade do sistema de sensoreamento.

Uma das dificuldades de todos os sensores, ópticos e não ópticos, é a interferência dos efeitos múltiplos. Um sensor de tensão ou pressão pode ser muito sensível à temperatura local. Nos últimos anos foram realizados grandes esforços em pesquisas e desenvolvimento em sensores ópticos visando obter alternativas para distinguir entre os efeitos de diferentes grandezas em um sensor. Um progresso considerável foi feito mas, no entanto, a variação da temperatura ainda é crítica, dependendo do tipo de sensor e aplicação.

1.3.2 Tipos de sensores ópticos

Atualmente a evolução da tecnologia de detecção óptica permite a medição de quase todo tipo de mensurando físico de interesse e diversas grandezas químicas. Todo tipo de mensurando possível de ser medido está listado na Tabela 1.5.

Mensurando	Mensurando
Temperatura	Espécies químicas
Pressão	Força
Fluxo de fluidos	Radiação
Nível de líquidos	pH
Deslocamento (posição)	Umidade
Vibração	Tensão mecânica
Rotação	Velocidade
Campos magnéticos	Campos elétricos
Aceleração	Campos acústicos
Índice de refração	Gases procedentes de incêndio
Sensor de produto tóxico	

Tab. 1.5: Principais mensurandos quantificados com uso de sensores ópticos.

Sensores extrínsecos e intrínsecos

No caso de sensores a fibra óptica, freqüentemente é feita uma distinção adicional, considerando se os mensurandos agem externamente ou internamente à fibra. Os sensores a fibra óptica podem ser convenientemente classificados de acordo com a maneira com que a fibra óptica é usada. Quando os transdutores são externos à fibra e ela meramente registra e transmite a quantidade detectada, os sensores são denominados extrínsecos; quando os sensores são parte da fibra ou são incorporados a ela, os sensores são denominados internos ou intrínsecos (8).

Sensores extrínsecos

Sensores a fibras ópticas extrínsecos são aqueles em que a fibra óptica é usada simplesmente para guiar a luz até a posição onde está localizado o elemento óptico sensor. Este elemento usualmente é baseado em componentes ópticos convencionais, discretos e miniaturizados, que são projetados com propriedades modulares para responder às variações da intensidade de luz no mensurando de interesse (8).

Nesta configuração, a energia óptica é transmitida através de uma fibra ao elemento óptico sensor, onde a luz sai da fibra. Devido à ação do parâmetro a ser medido, o mensurando, a luz que sai da fibra pode ser parcialmente absorvida, modulada, colimada e focalizada, polarizada ou sofrer alteração no estado de polarização, e então retorna, através de uma segunda fibra, ao detector óptico (Figura 1.5).

Alternativamente, a luz pode ser acoplada para retornar pela mesma fibra por reflexão, e guiada de volta ao sistema de detecção. Este caso requer alguma forma de dispositivo divisor de potência, para separar os feixes de luz de entrada e de saída (Figura 1.6). Tal sensor pode ser classificado como um sensor extrínseco refletivo (8).

Exemplos de sensores extrínsecos são as grades móveis para sensoreamento de tensão mecânica, os acopladores fibra-a-fibra para sensoreamento de deslocamento, e as células de absorção para sensoreamento de efeitos químicos.

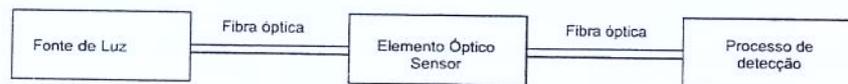


Fig. 1.5: Modo transmissivo.

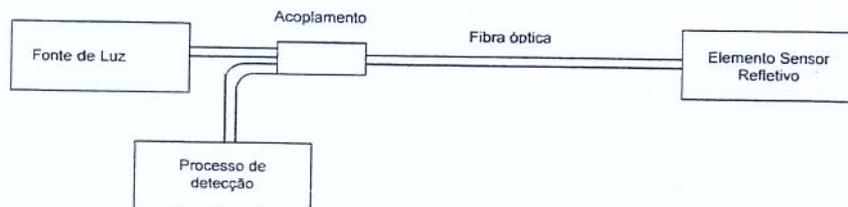


Fig. 1.6: Modo reflexivo.

Sensores intrínsecos

Sensores a fibra óptica intrínsecos são os sensores em que a luz não sai da fibra no local ou ponto de medição. A luz sofre interações em função do mensurando e continua sendo guiada até o local de detecção. Nos sensores intrínsecos, a variável de interesse, o mensurando, deve de alguma forma,

modificar as características físicas da fibra óptica, a fim de provocar algum efeito nas propriedades da luz guiada pela fibra. Convém lembrar que, normalmente, os cabos de fibras ópticas são projetados para minimizar tais efeitos, que são indesejáveis em sistemas de telecomunicações.

Portanto, é necessário usar fibras ou empacotamentos especiais, ou projetar um sistema sofisticado de sensoriamento para que seja sensível a perturbações específicas (8). Sistemas mecânicos simples podem ser construídos facilmente para provocar uma curvatura na fibra, provocando uma atenuação proporcional a um evento mecânico, por exemplo, a abertura de uma porta pode provocar uma curvatura na fibra óptica e ser detectada a vários quilômetros de distância por um OTDR.

Exemplos de sensores intrínsecos são aqueles que usam as perdas de macro-curvaturas na fibra para sensoriamento da tensão, fibras com revestimentos modificados para fazer medidas espectroscópicas, e contador de propagação de feixes dentro de uma fibra bobinada para medir a rotação.

Sensores parcialmente intrínsecos e parcialmente extrínsecos

Existem ainda sensores parcialmente intrínsecos e parcialmente extrínsecos. É o caso dos sensores que operam por campo evanescente, em que a luz procedente do campo evanescente de uma fibra devidamente preparada interage com o mensurando, perdendo ou ganhando luz do meio externo ao da fibra. Ou, de outra forma, parte da luz guiada é perdida da fibra e a interação com o meio externo pode aumentar a quantidade de luz perdida.

1.3.3 Meios de sensoriamento

Os sensores a fibra óptica, intrínsecos ou extrínsecos, operam pela modulação de uma (ou mais) das seguintes características da luz guiada: a intensidade, o comprimento de onda ou a frequência, o estado da polarização e fase, ou o atraso de grupo. Devemos ter em mente, entretanto, que o sinal detectado utilizando um sensor que opera, por exemplo, modulando a polarização da luz, ainda será proporcional à intensidade da luz que chega ao fotodetector.

Destaca-se o fato de que limites rigorosos não podem ser facilmente extraídos ao se classificar sensores por mecanismos de modulação. Geralmente ocorre uma determinada quantidade de sobreposição de uma dada grandeza no mensurando (8).

Os sensores denominados sensores de intensidade ou interferométricos, de maneira simplificada, realizam medidas da intensidade da luz ou da mudança de fase. As técnicas usadas para os sensores de intensidade incluem: espalhamento da luz (espalhamento Rayleigh e Raman), variação do comprimento de onda que o sensor reflete (Grade de Bragg), mudanças na perda da transmissão espectral (isto é, atenuação simples da luz transmitida devido à absorção) micro-curvaturas ou perdas radiativas, mudança de refletância (Fabry-Perot), mudança nas propriedades modais da fibra.

Os sensores interferométricos foram realizados baseados no efeito magneto-óptico, no efeito Doppler, como nos interferômetros de Fabry-Perot, Sagnac, Michelson e outros. Para citar um exemplo prático, o sensor interferométrico Fabry-Perot extrínseco e a fibra óptica, apresentado por vários grupos de trabalho e autores, é um dos sensores a fibra óptica mais populares que vem sendo usado e implementado para ser usado em diversas aplicações, medir deslocamentos, tensões mecânicas, temperaturas, intensidade de campo elétrico, etc. Foi inicialmente desenvolvido para monitorar estruturas (10), (1).

Hoje, a maioria dos mensurandos apresentados na Tabela 1.5 podem ser detectados pela intensidade ou por técnicas interferométricas, assim como efeitos pontuais ou distribuídos. Uma grande variedade de fenômenos físicos é usada para realizar o sensoriamento.

O sensor de deslocamento a fibra óptica talvez seja o mais básico de todos os tipos de sensores a fibra óptica porque pode ser implementado para medir diversos parâmetros físicos relacionados que provoquem um deslocamento interagindo com uma base transdutora.

Deve possuir características importantes, principalmente ser insensível, ou com menor dependência possível das flutuações ambientais da temperatura e da pressão ou devem utilizar técnicas sofisticadas de demodulação, que compensa as variações do sinal de saída devido à presença destas perturbações adicionais, variações de temperatura e pressão. Por exemplo, numa configuração integrada, os sensores de deslocamento calibrados para medições de tensão mecânica axial devem ter a sensibilidade às outras tensões mecânicas, presentes em outros eixos minimizadas.

A presença de não-linearidades no sinal de resposta do sensor requer procedimentos de demodulação mais elaborados e dispendiosos, ou necessitam de uma pré-calibração e incompatibilidades de sensor para sensor. Idealmente o sensor deve prover uma medição absoluta e em tempo real do deslocamento ou tensão mecânica e também manter a sensibilidade estável.

1.3.4 Sensoriamento pontual e distribuído

No sensoriamento pontual, o transdutor pode estar na extremidade de uma fibra com a finalidade de levar e de trazer luz a um outro transdutor. Os exemplos desse tipo de sensor são os interferômetros ligados às extremidades das fibras para medição de temperatura, pressão, tensão mecânica e intensidade de campo elétrico.

Num sensoriamento distribuído, como o nome implica, as detecções são executadas ao longo de todo o comprimento da fibra, de maneira contínua ou segmentada e multiplexados no tempo ou na frequência. Na recepção, esse conjunto de dados deve ser demultiplexado, permitindo assim um mapeamento do parâmetro medido. Exemplos deste tipo de sensor são: os interferômetros de Fabry-Perot intrínsecos, ou as Fibras com grades de Bragg (Fiber Bragg Grating), que podem ser distribuídos ao longo de um comprimento de fibra para medir deslocamentos, tensões mecânicas, temperaturas ou a

intensidade de campos elétricos.

O uso de interferômetros de FP intrínsecos ao longo da fibra requer o uso de um refletômetro óptico (OTDR-Optical Time Domain Reflectometer) para obter os dados que são, a partir da concepção, multiplexados em tempo.

O uso das Grades de Bragg requer uma fonte de luz com o espectro largo, um acoplador óptico e um analisador de espectro óptico (OSA-Optical Spectrum Analyser) e cada uma das grades de Bragg deve atuar como refletora em comprimentos de onda diferentes. O OSA permite uma medida direta do deslocamento da linha refletida de cada FBG instalada ao longo da fibra. Uma alternativa, utilizando a mesma rede de sensores, é fazer a análise do sinal transmitido. As fibras com dopantes especiais ficam sensíveis a variações de temperatura e alteram o índice de refração local. Com um OTDR, é possível medir as variações de luz ao longo da fibra por retro-espalhamento e obter a variação da tensão mecânica ou da temperatura.

1.3.5 Sensor interferométrico Fabry-Perot

A configuração de um sensor interferométrico Fabry-Perot extrínseco está esquematizada na Figura 1.7. A cabeça sensora está expandida e detalhada.

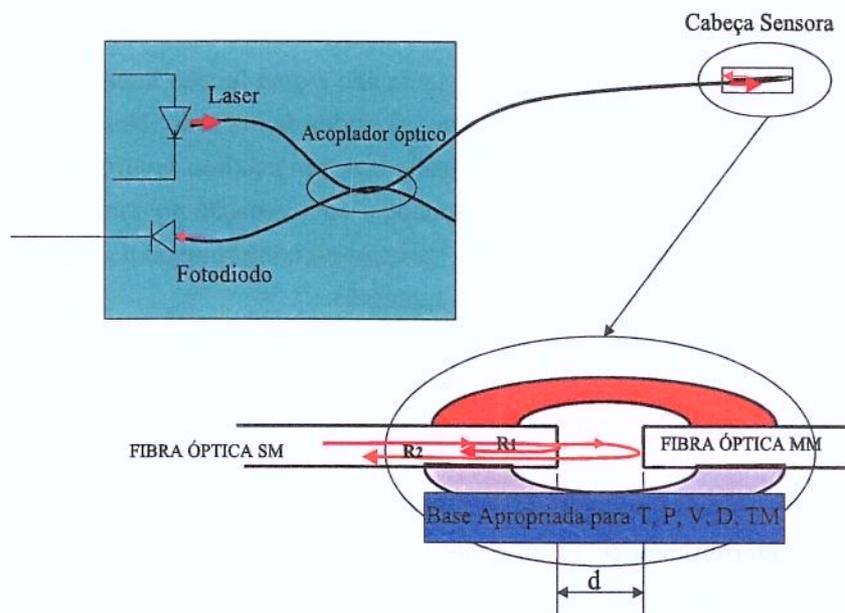


Fig. 1.7: Configuração de um sensor interferométrico FP extrínseco.

O detalhe da cabeça sensora mostra a fibra de entrada e a refletora alinhadas e presas por um tubete oco, que é devidamente fixado numa base transdutora apropriada para converter: ou temperatura, ou

pressão, ou tensão mecânica, ou um campo elétrico em deslocamento axial, como mostra a Figura 1.7. A cabeça é composta de duas fibras ópticas de faces planas e nuas, em que a reflexão de Fresnel é de aproximadamente 4% e que resulta das interfaces vidro/ar e ar/vidro e que definem uma cavidade.

A primeira reflexão R1 é chamada reflexão de referência e é independente da perturbação externa aplicada. A segunda reflexão na interface ar/fibra da fibra seguinte, R2, é a reflexão sensora e depende do tamanho da cavidade d , que retorna modulada pela perturbação aplicada. Estas duas reflexões interagem (desde que $2d < L_c$ onde L_c é o comprimento de coerência da fonte de luz) e a intensidade I no detector varia em função do tamanho da cavidade d :

$$I = I_0 \cos(4pd/\lambda) \quad (1.1)$$

onde, I_0 é o valor máximo da intensidade de saída, e λ é o comprimento de onda central da fonte de luz.

A Figura 1.8 mostra uma curva típica da função de transferência Intensidade \times Deslocamento para os sensores por interferência de FP extrínsecos, com ar preenchendo espaço entre as extremidades entre as fibras, com refletividade 4%. Caso fosse usado outro material com refletividade maior (50% - 75%), a transição seria mais abrupta. Pequenas perturbações que geram alguma alteração da intensidade em torno do ponto quiescente (ponto Q) do sensor cobrem uma região aproximadamente linear na curva da Intensidade de saída em função do deslocamento aplicado.

Para deslocamentos maiores, o sinal de saída não é uma função linear do sinal de entrada. Além disso, o sinal de saída pode variar sobre vários períodos de um seno. Neste caso, cada franja no sinal de saída é definido como a variação em intensidade de um máximo a outro máximo, ou de um mínimo a outro mínimo. Assim, cada franja corresponde a uma variação no comprimento da cavidade dada pela metade do comprimento de onda λ . A variação no comprimento da cavidade δd pode ser usada para calcular a tensão mecânica, a partir da expressão:

$$\epsilon = \delta d/L \quad (1.2)$$

onde, L é definido como comprimento de aferição do sensor e δd é a distância entre os dois pontos onde as fibras de entrada e refletora estão presas (1).

No sensor interferométrico FP intrínseco, a operação é similar à operação do extrínseco, com alguma diferença na configuração (18). Como no sensor extrínseco, uma das pernas do acoplador A, indicado na Figura 1.9, é estendida até a cavidade FP, composta por duas fibras de composição distinta emendadas, ou por uma junção de duas fibras entremeadas com um segundo material (diferente da sílica, orgânico ou inorgânico) e com índice de refração maior que o da sílica, que são fixadas sobre a base transdutora, que converte uma variação de temperatura, tensão mecânica, ou campo elétrico em

deslocamento paralelo ao eixo da fibra.

A cavidade pode ser implementada com a introdução de duas reflexões de Fresnel (ou mais de uma) ao longo de uma fibra que é a extensão da perna do acoplador (19). Esta construção é sensível à variações externas devido à variação de temperatura porque agora o valor de índice de refração depende da temperatura ($n = n(T)$) que altera a fase do sinal sensor S (20).

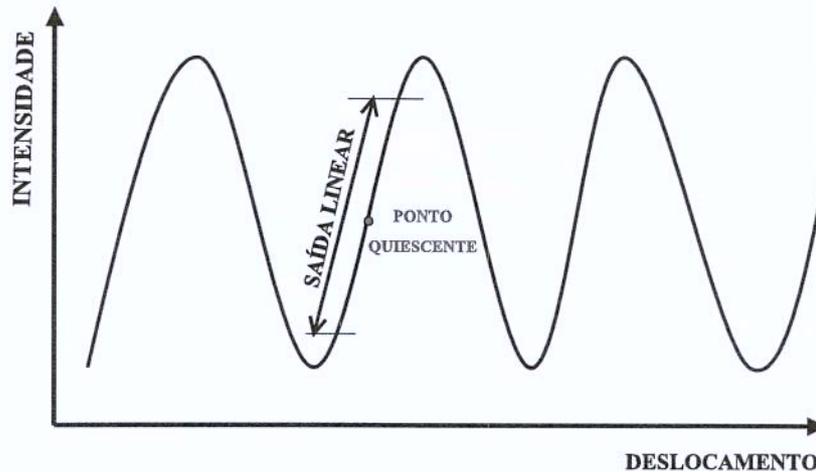


Fig. 1.8: Variação da intensidade em função do deslocamento em torno do ponto Q.

Um sensor FP construído com a configuração de cavidade acima descrita tem muitas limitações, pois apresenta não-linearidades no sinal de saída e responde como um elemento diferenciador, (o sinal de saída é uma derivada do sinal de entrada) na escala de comprimento de onda.

Por isso a construção de uma cavidade FP deve ser otimizada, com o uso de filmes metálicos finos (com espessura menor que $\lambda/2$) depositados sobre as faces da fibra, e a utilização de fonte com espectro largo (luz branca), o que diminui a largura de linha na região espectral de interesse e resulta em melhor sensibilidade. A faixa espectral coberta por um FP é inversamente proporcional ao tamanho d da cavidade, e é dada por:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_1\lambda_2}{2d} \quad (1.3)$$

onde, $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$, λ_2 e λ_1 dão uma defasagem igual a 2π radianos (10). Por isso as perturbações externas são facilmente detectáveis pelo monitoramento do deslocamento espectral na região de interesse. Por exemplo, uma cavidade FP para operar na faixa espectral de 1520 nm a 1580 nm, deve ser construído com o espaçamento d entre as faces dado por:

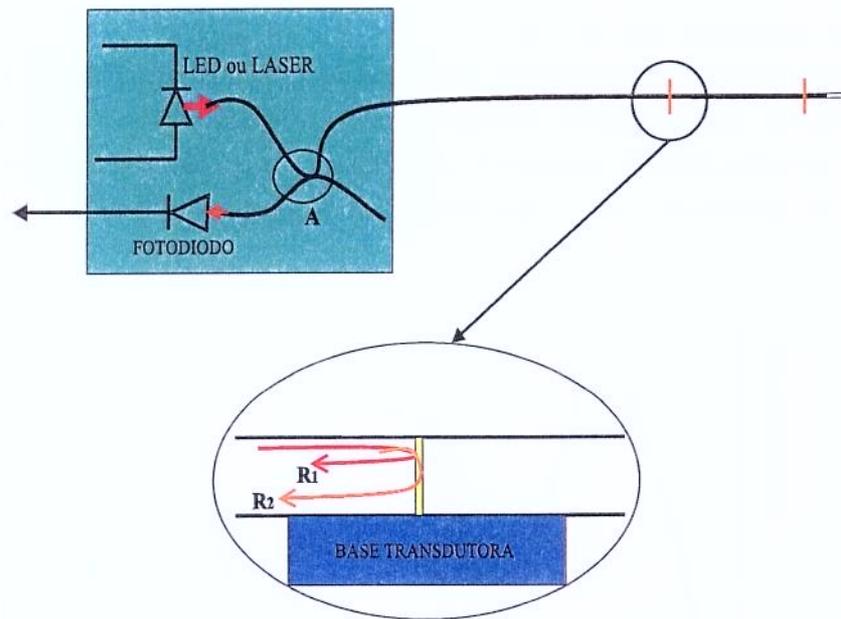


Fig. 1.9: Configuração de um sensor FP intrínseco.

$$d = \frac{(1520 \times 1580)}{(2 \times 60)} \text{ nm} \approx 2 \mu\text{m} \quad (1.4)$$

Como anteriormente descrito, os interferômetros de FP são sensores de deslocamento e podem ser implementados para monitorar diversos parâmetros relacionados a um deslocamento mecânico. Medem temperatura, a partir da expansão térmica da unidade em que o sensor de deslocamento está montado e medem a tensão mecânica ou pressões aplicadas ao corpo em que o interferômetro FP está montado.

Podem também medir a intensidade de um campo elétrico, desde que a base mecânica que fixa as fibras do sensor (FP extrínseco), ou fixa uma fibra emendada (FP intrínseco), seja uma base composta de material piezoelétrico. Neste caso é necessário orientar o sensor com o campo elétrico para otimizar a sensibilidade.

O FP é feito frequentemente nos materiais tais como o vidro, a calcita, ou o seleneto de zinco (ZnSe). Quando utilizados para medição de temperatura, o desempenho dos sensores FP fica com a faixa limitada na ordem de 400 °C, em função dos materiais utilizados no encapsulamento.

1.3.6 Sensor com grade de Bragg em fibra óptica

Outro sensor intrínseco que vem sendo utilizado e implementado para quantificar os mais diversos parâmetros, deslocamento, temperatura (10), pressão (12), tensão mecânica (13), corrente elétrica,

campo elétrico (14; 1), e outros, é o sensor com grade de Bragg em fibra óptica.

Em 1978, Hill e colaboradores (15) descobriram o fenômeno de fotossensibilidade em fibras ópticas. Foi descoberta a possibilidade de induzir alterações permanentes no índice de refração do núcleo das fibras, expondo os núcleos dopados com germânio a altas intensidades de luz procedentes de um laser de Argônio, com comprimentos de onda de 488 ou 515 nm.

Após a exposição, Hill encontrou uma modulação senoidal do índice de refração do núcleo, ao longo do eixo da fibra, criado pela variação espacial de intensidade ao longo do núcleo. O feixe dá origem a uma grade, que pode ser utilizada para acoplar energia do modo fundamental a vários modos, que podem ser guiados ou desacoplados e perdidos.

Mais tarde Later Meltz e outros (16) sugeriram que a fotossensibilidade é mais eficiente (pronunciada) se a fibra for exposta a um feixe lateral para gravação da grade com comprimento de onda de 242 nm, que é o comprimento de onda de maior absorção do Germânio que dopa o núcleo das fibras ópticas utilizadas em telecomunicações.

A Figura 1.10 ilustra um segmento de fibra óptica com uma grade de Bragg, com período espacial Λ gravada ao longo do eixo do núcleo da fibra. As grades, construídas em fibra, com cerca de 10 a 100 mm de comprimento, são praticamente imperceptíveis a olho nú. As cores foram utilizadas para facilitar a apresentação da estrutura de uma grade.

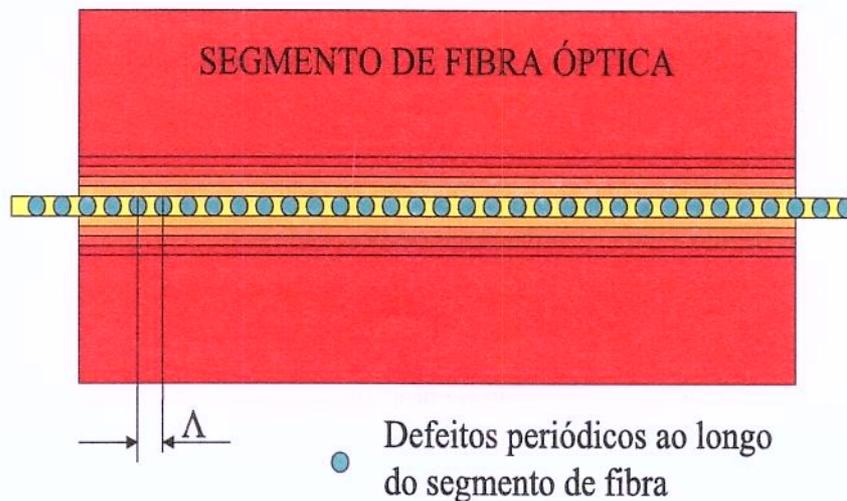


Fig. 1.10: Configuração de uma grade de Bragg ao longo de um segmento de fibra.

As grades de Bragg são previamente projetadas com períodos Λ para refletir os comprimentos de onda em torno de um determinado λ_R , de fase casada com a estrutura da grade. Portanto, a grade age como um refletor sintonizado em λ_R , reflete, com grande eficiência, os comprimentos de onda próximos a λ_R e transmite os demais. A Figura 1.11 ilustra o mecanismo de operação de uma fibra

com grade de Bragg, sobre um feixe contendo várias componentes espectrais.

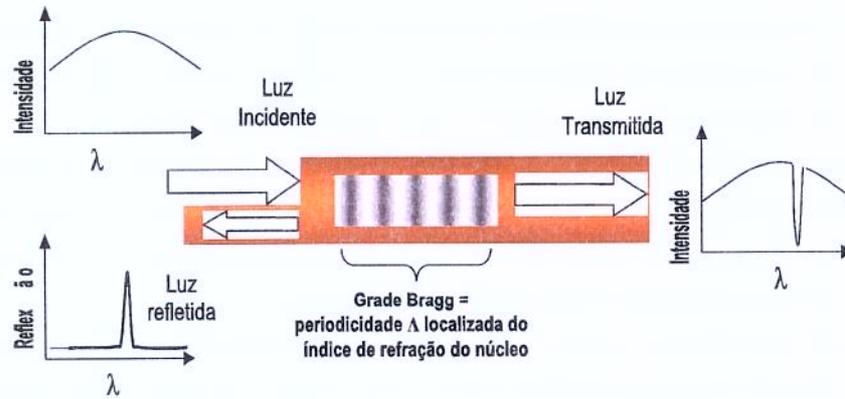


Fig. 1.11: Configuração de uma grade de Bragg ao longo de um segmento de fibra.

A operação das grades de Bragg em fibras ópticas é baseada na condição de casamento de fase entre os modos que propagam pela fibra. Esta condição é dada por:

$$K_g + K_c = K_B, \quad (1.5)$$

onde, K_g , K_c e K_B são os vetores de onda dos modos acoplado e guiado (k_g), acoplado resultante (K_c) e da grade (K_B).

Para uma interação de primeira ordem, $K_B = 2\pi/\Lambda$, onde Λ é o período espacial da grade. Em termos de constante de propagação, esta condição se reduz a forma geral de interação para acoplamento de modos devido a uma perturbação periódica, dada por:

$$\Delta\beta = \frac{2\pi}{\Lambda}, \quad (1.6)$$

onde $\Delta\beta$ é a diferença entre as constantes de propagação dos dois modos envolvidos no acoplamento de modos, assumindo que os dois modos viajem na mesma direção. Grades de Bragg em fibra envolvem o acoplamento do modo fundamental na direção de propagação LP01 em um sentido com o modo LP01 propagando no sentido oposto (17). Considerando-se as constantes de propagação β_{01} do modo fundamental propagando em um sentido da fibra e $-\beta_{01}$ no sentido oposto, temos que:

$$\Delta\beta = \beta_{01} - (-\beta_{01}) = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (1.7)$$

onde, $\beta_{01} = 2\pi n_{ef} / \lambda$, n_{ef} é índice de refração efetivo da fibra percebido pelo modo fundamental, λ é o comprimento de onda da fonte no espaço livre. Portanto:

$$\lambda_B = 2\Lambda n_{ef} \quad (1.8)$$

onde, λ_B é o comprimento de onda de Bragg, comprimento de onda para o qual o modo co-propagante LP01 acopla ao modo LP01 contra propagante, λ_B depende de λ porque as constantes de propagação dos dois modos são funções de λ . A componente da grade de Bragg em fibra pode ser inspecionada utilizando uma fonte de luz espectralmente larga. O comprimento de onda λ_R em que ocorre o casamento de fase é retro-espalhado, e varia em função do período da grade Λ e do índice de refração efetivo n_{ef} percebido pelo modo fundamental da fibra:

$$\lambda_R = 2\Lambda n_{ef} \quad (1.9)$$

Uma vez que a tensão mecânica e a temperatura podem mudar os dois parâmetros, Λ e o n_{ef} , o comprimento de onda refletido por uma grade de Bragg em fibra pode ser modulado por estas perturbações externas. Ocorre um deslocamento espectral da luz retro-espalhada pela grade, que pode ser usada para medir diversas grandezas, permitindo, desta forma, desenvolver e implementar aplicações destas grades para os mais diversos tipos de mensurandos.

Uma vez que a diferença entre as constantes de propagação β dos modos envolvidos no acoplamento é grande, podemos verificar que a partir de $\beta = 2\pi/\Lambda$, somente um pequeno período Λ é suficiente para induzir este acoplamento de modos. Para fibras utilizadas em comunicações ópticas, o valor típico de λ_B é aproximadamente $1,5 \mu\text{m}$. Da equação $\lambda_B = 2\Lambda n_{ef}$, Λ é aproximadamente $0,5 \mu\text{m}$, para $n_{ef} = 1,5$, que é um valor aproximado do índice de refração em fibras de vidro. Devido ao pequeno período, da ordem de $1,0 \mu\text{m}$, as FBG são classificadas como grades de período curto.

Da equação $\lambda_B = 2\Lambda n_{ef}$, vemos que o comprimento de onda de Bragg pode variar em função de Λ ou de n_{ef} . A variação relativa no comprimento de onda de ressonância $\Delta\lambda/\lambda$ é dada por:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} + \frac{\Delta n_{ef}}{n_{ef}} \quad (1.10)$$

onde os termos à direita da igualdade da variação relativa em λ são as variações relativas no período da grade e no índice efetivo. As magnitudes relativas das duas variações dependem do tipo de perturbação que a fibra com grade está submetida. Para a maior parte das aplicações, o efeito devido à variação no índice efetivo é o mecanismo dominante.

Uma tensão axial ϵ numa FBG altera o período da grade e o índice efetivo, o que resulta num deslocamento do λ_B , que é dado por:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda\epsilon} = \frac{\Delta\Lambda}{\epsilon\Lambda} + \frac{\Delta n_{ef}}{\epsilon n_{ef}} \quad (1.11)$$

onde o primeiro termo à direita da equação é relativo ao período da grade e o segundo termo tem origem no efeito fotoelástico. Uma tensão axial na fibra serve para variar o índice de refração tanto do núcleo quanto da casca, o que resulta numa variação no valor do n_{ef} do vidro.

O valor do coeficiente fotoelástico do vidro ou coeficiente de tensão óptica é de aproximadamente -0,27, logo as variações de n_{ef} e Λ devido à tensão mecânica, tem efeitos sobre o pico de Bragg.

A variação no λ_B devido à tensão mecânica axial é 0,73%, ou 73% da tensão aplicada. Em 1550 nm e 1310 nm, os deslocamentos observados no comprimento de onda de ressonância são 11 nm/% ϵ e 9 nm/% ϵ , respectivamente.

Uma FBG operando em 1550 nm desloca o pico do comprimento de onda refletido em 1,6 nm, para cada incremento de 100 °C no valor da temperatura.

Os sensores de FBG apresentam as seguintes limitações:

- complexidade para construir uma grade em fibra;
- custo;
- é necessário o uso de luz ultra violeta de alta energia para construir as grades, uma vez que a variação do índice de refração n entre o núcleo e a casca, é da ordem de $5 \cdot 10^{-3}$;
- o valor de λ está limitado entre 0,1 e 1 nm;
- a limitação em λ requer espectrômetros de alta resolução para implementar sensores;
- são susceptíveis a perturbações externas;
- no caso de medições de tensão mecânica, o sensor não tem sensibilidade para detectar tensões abaixo de 111 $\mu\epsilon$ (1).

Por outro lado, as FBGs apresentam a vantagem de poderem ser utilizadas para sensoriamento de vários parâmetros, além de estarem atualmente em fase de pleno desenvolvimento e aplicações. Podem ser utilizadas em um sistema de sensoriamento distribuído por vários pontos ou em ponto único 'in-situ'. A Figura 1.12 ilustra o princípio de operação de um sistema de sensoriamento distribuído, utilizando uma rede óptica com grades de Bragg ao longo da fibra, onde cada grade é sintonizada para refletir um único λ_i (1).

Caso seja necessário controlar um único parâmetro em determinado ponto fixo 'A', a Figura 1.13 mostra um esquema de uma versão simplificada do circuito óptico. Neste caso, a variação do mensurando induz uma variação em λ_B refletido, e a variação do sinal refletido é comparada com a variação do sinal transmitido, e a medida pode ser feita observando a amplitude do sinal refletido. Por isso as regiões do espectro com maior sensibilidade são as duas regiões de subida e descida do $I(\lambda)$,

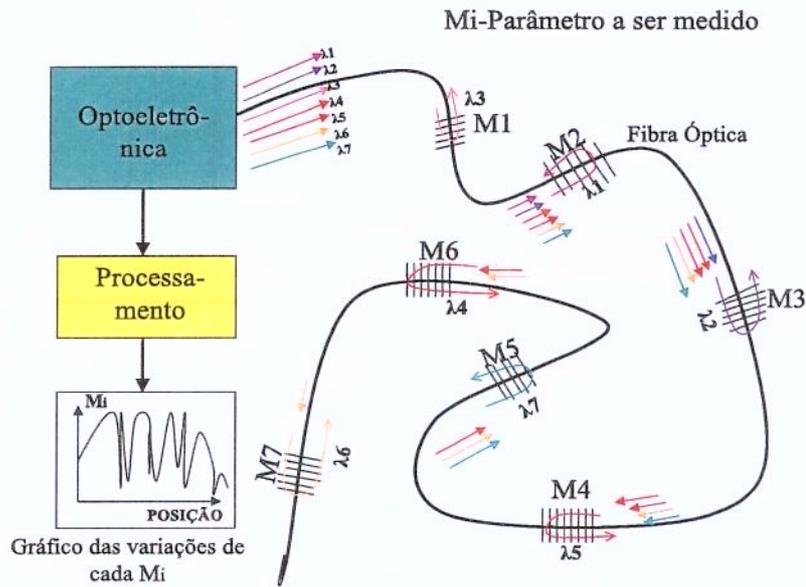


Fig. 1.12: Princípio de operação de um sistema de sensores distribuído utilizando uma rede óptica com grades de Bragg ao longo da fibra.

onde uma pequena variação de λ causa a maior variação na intensidade $I(\lambda)$. A região com menor sensibilidade é a região do patamar da curva $I(\lambda)$.

O desempenho e sensibilidade de um sensor óptico usando FBG, configurado para medir o deslocamento ou variações do λ refletido em função das variações do mensurando, pode ser otimizado montando a grade em conjunto com um interferômetro de Michelson a fibra. Quando a resposta do sensor (deslocamento do λ refletido em função da variação do mensurando) fica difícil de ser diretamente medida com precisão segura com um analisador de espectro, o sinal refletido pela FBG do sensor óptico passa por um interferômetro de Michelson composto por um circuito de fibras, com diferença de comprimento entre os braços do interferômetro, e dois acopladores ópticos, A1 e A2, como mostra a Figura 1.14.

Os sinais ópticos nas portas de saída do interferômetro apresentam uma diferença de fase que é dada por:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi n_d \Delta\lambda}{\lambda^2} \quad (1.12)$$

onde $\Delta\Phi$ é a diferença de fase entre os sinais ópticos dos braços do interferômetro, n é o índice de refração do núcleo da fibra utilizada para montar o interferômetro, λ é o comprimento de onda refletido pela FBG e $\Delta\lambda$ é a variação do comprimento de onda refletido induzida pela variação do mensurando.

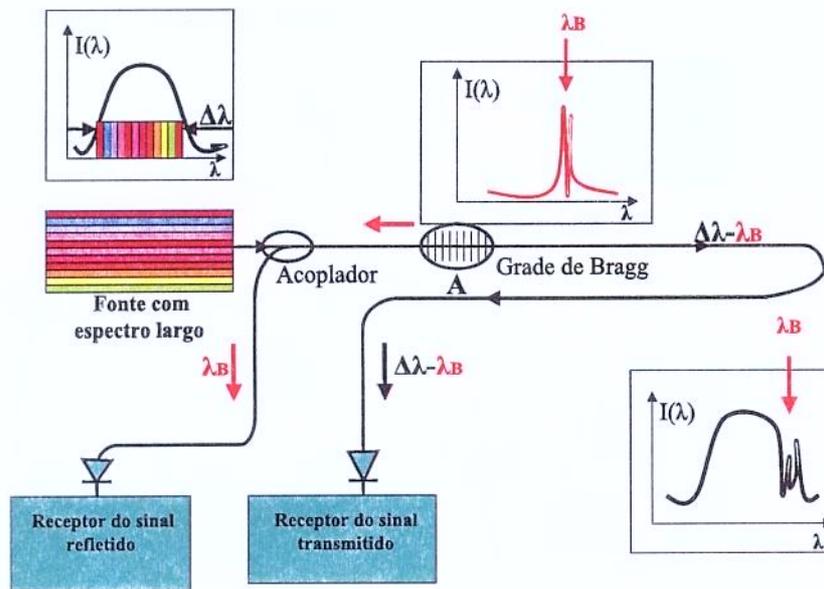
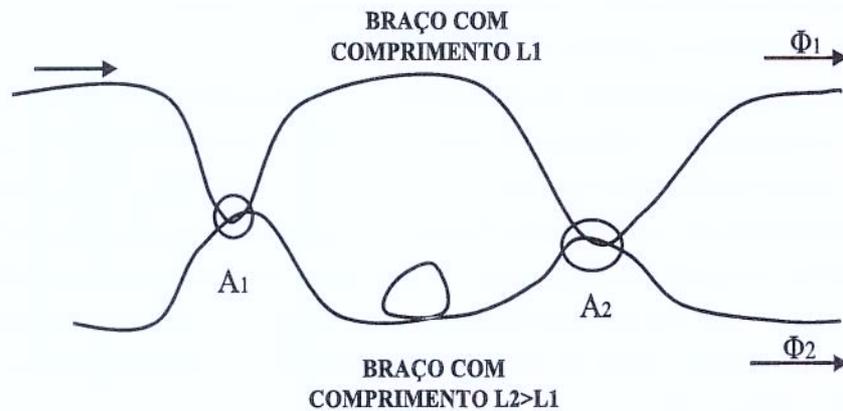


Fig. 1.13: Sensor óptico utilizando grade de Bragg em fibra medindo um parâmetro localizado em um ponto A.



$$\Delta\Phi = 2\pi n|L_2 - L_1|\Delta\lambda / \lambda^2$$

Fig. 1.14: Interferômetro de Michelson a fibra.

Mede-se a variação do comprimento de onda em função da variação do mensurando de forma indireta, medindo a variação da diferença de fase entre os braços do interferômetro e fazendo um cálculo inverso para encontrar o valor de $\Delta\lambda$.

A Figura 1.15 ilustra o funcionamento de um sensor a FBG em conjunto com um interferômetro de Michelson e um receptor óptico diferencial. O receptor óptico é um circuito composto por dois fotodiodos, um para cada braço de saída do interferômetro, e um amplificador diferencial, em que o sinal de saída é proporcional ao co-seno da diferença de fase dos sinais de cada fotodiodo.

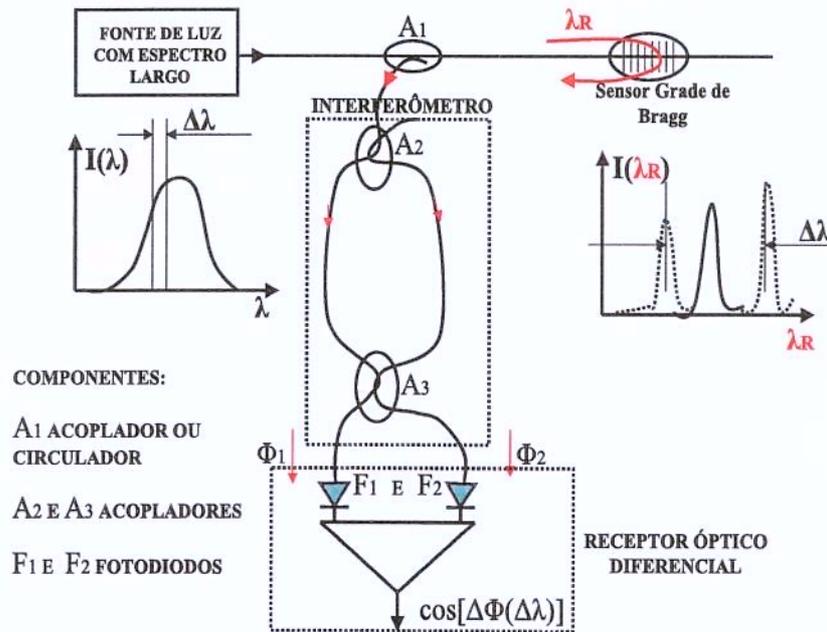


Fig. 1.15: Sensor de Bragg a fibra montado para operar como Interferômetro de Michelson a fibra.

Outra alternativa para medir as variações do mensurando, sem necessidade de um analisador de espectro óptico, pode ser implementada utilizando-se um componente acoplador óptico WDM (Wavelength Division Multiplexer), com uma curva de transmissão dos braços de saída com alta periodicidade em comprimento de onda.

Para ilustrar o que é um acoplador de alta periodicidade de transmissão, pode-se considerar o acoplador óptico WDM 1310/1550 nm, que apresenta uma periodicidade em λ de até 480 nm, o que não é alta, enquanto que o acoplador de alta periodicidade de transmissão apresenta uma periodicidade de cerca de 20 nm.

A Figura 1.16 ilustra como um acoplador WDM divide a luz procedente de uma fonte de luz com faixa larga, λ grande. O LED (Light Emitting Diode) tem $\lambda \simeq 60$ nm, sendo que na figura o espectro do LED aparece subdividido em cores visíveis. As cores que seguem pelo braço 2 estão presentes no braço 3, a um nível 25 dB abaixo; as cores que seguem pelo braço 3 também estão no braço 2, cerca de 25 dB abaixo. A resposta dos braços 2 e 3 do acoplador WDM em λ são, aproximadamente, duas funções senoidais defasadas em 180°.

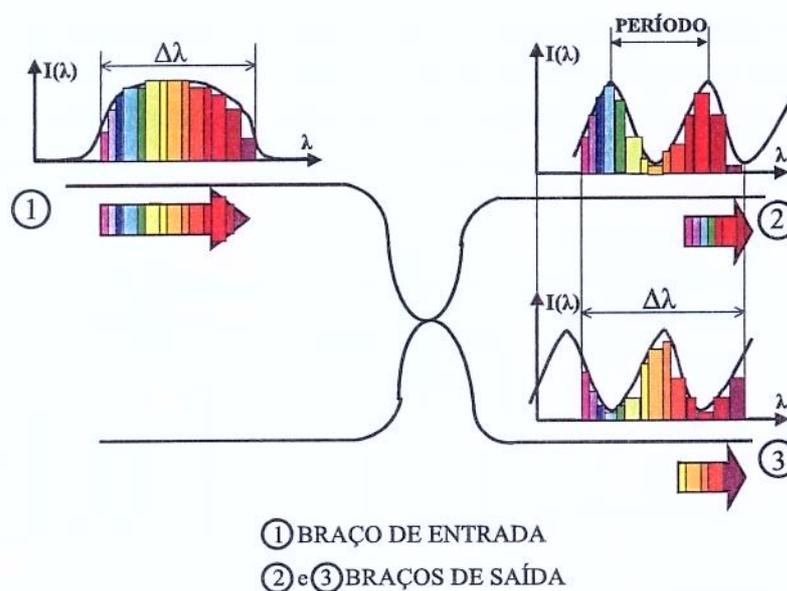


Fig. 1.16: Divisão de λ por um acoplador WDM.

Utilizando este componente WDM, uma FBG como sensor a fibra, um acoplador comum e dois sistemas de recepção óptica, detector e amplificador, é possível construir um sistema de sensoramento, como mostra a Figura 1.17, sem necessidade de um analisador de espectro óptico (1).

Recentemente vêm sendo desenvolvidas e exploradas as grades de Bragg a fibra com períodos longos, (períodos Λ com centenas de μm) (21; 22). As grades de período longo têm atraído atenção de vários centros de pesquisa e desenvolvimento, por apresentarem algumas propriedades peculiares e também por apresentarem vantagens em relação às FBGs convencionais.

As principais vantagens são: facilidades no processo de fabricação, retro-espalhamento baixo, perda de inserção baixa, insensível ao estado de polarização da luz. Apresentam maior sensibilidade às variações de: temperatura (23), curvatura (24), torção (25) e também sensibilidade à carga, ao serem pressionadas no sentido radial. Estas vantagens tornam os sensores construídos com FBG em fibra de periodicidade longa mais indicados para os casos que requerem maior sensibilidade.

Os sensores a grade de período longo estão em fase de pleno desenvolvimento do processo fabril. No processo fabril as fibras podem ser gravadas, expondo-as em luz ultravioleta (26), ou expondo o núcleo da fibra no ponto focal de uma luz de alta potência em regime pulsado, fornecida por lasers de CO₂(27).

As FBG em fibra construídas com períodos longos apresentam uma periodicidade de 500 μm , tendo, em média, 50 pontos marcados, o que corresponde a um comprimento ativo de 25 mm. Grades construídas com a mesma periodicidade, com 20 pontos e 10mm de grade, também apresentam

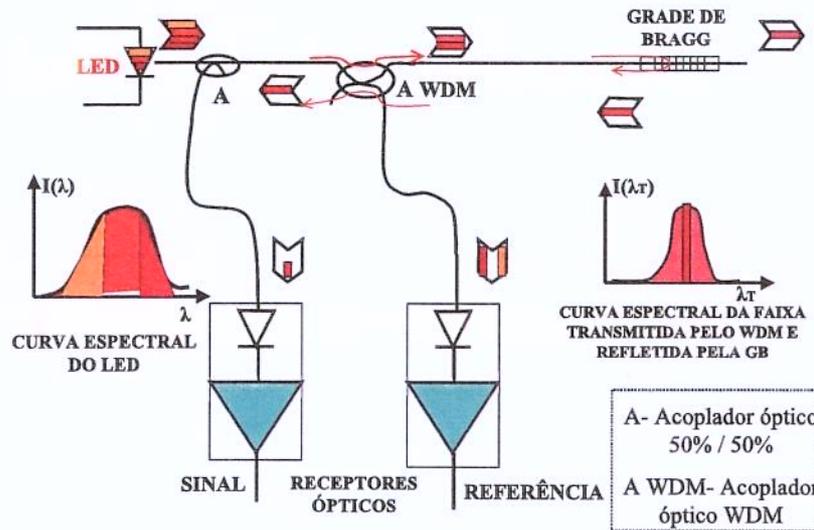


Fig. 1.17: Sistema de sensoreamento usando acoplador WDM e dois receptores ópticos para sinal de referência.

mesmo desempenho, comprovado experimentalmente.

Os sensores podem ser construídos com os mensurandos atuando sobre as grades de períodos longos. No sentido longitudinal, tensionando a grade; atuando de forma rotacional, torcendo a fibra em torno do eixo; ou atuando com carga, pressionando a região da grade. A Figura 1.18 compara uma FBG a fibra convencional com uma FBG com períodos longos.

1.3.7 Construção da grade de Bragg

Uma vez que as grades de Bragg são preparadas sobre as fibras comerciais, é necessária uma preparação da fibra para construção das grades. Ao preparar as fibras para submetê-la a radiação de UV é necessário remover os revestimentos primários, que protegem o vidro da umidade externa (a umidade provoca envelhecimento mecânico do vidro). Por isso, após ser submetida à radiação de UV, é necessário tratar a região exposta com ácido sulfúrico concentrado, que absorve umidade. Logo em seguida o revestimento primário é refeito. A grade é fabricada submetendo a fibra à radiação de UV ($\lambda = 248 \text{ nm}$ ou $\lambda = 193 \text{ nm}$). A grade é criada ponto a ponto ou, utilizando uma máscara, para submeter todo o trecho de fibra a radiação de UV em pontos equidistantes, simultaneamente.

Já foram utilizadas e desenvolvidas técnicas de fabricação de grades em fibra durante o processo de puxamento da fibra, a uma velocidade entre 0,1 e 2,5 m/min. Antes de receber o revestimento

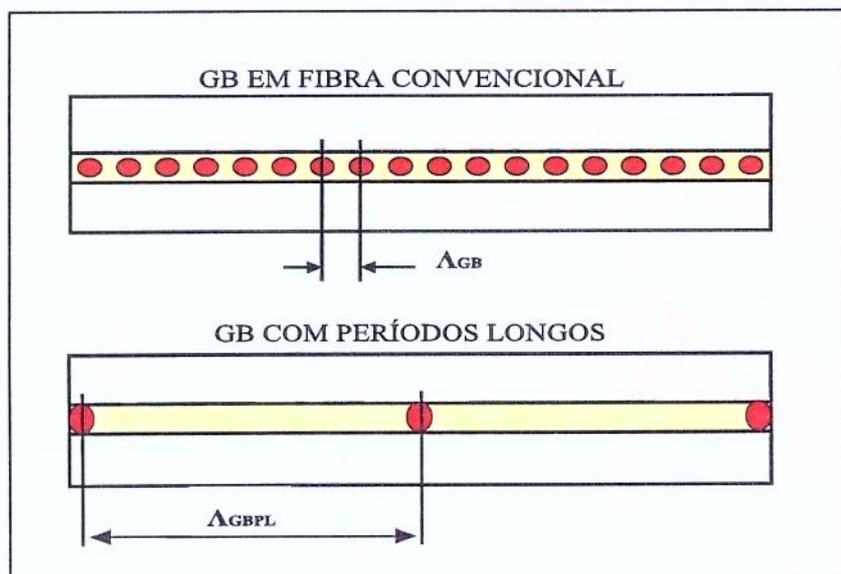


Fig. 1.18: Comparação das estruturas de FBG em fibra, a convencional com períodos Λ_{GB} e a de períodos longos.

primário, a fibra é irradiada em pontos periodicamente separados (28; 29; 30; 31). A vantagem deste processo é que as grades resultantes têm maiores resistências mecânicas que as grades preparadas utilizando fibras comerciais descascadas e novamente revestidas.

Outras alternativas estão sendo desenvolvidas e utilizadas em busca da maior resistência mecânica das grades, tais como o uso de revestimentos especiais e a preparação de grades utilizando UV de $\lambda = 193$ nm ao invés UV de $\lambda = 248$ nm (30; 31). Além das fibras de vidro, sílica dopada com Germânio e Boro, vidro especiais à base de vidro com Deutério e vidros à base de Nitretos estão sendo desenvolvidos em busca de melhor desempenho mecânico, maior durabilidade, e de grades com maior sensibilidade ao ser submetidas a variações externas (os mensurandos) (32; 33). Fibras com estruturas especiais, com materiais não vítreos, poliméricas com baixo custo e à base de cristais, para operar em $\lambda = 2,5 \mu\text{m}$, também estão sendo desenvolvidas (34; 35).

As grades de Bragg também já foram construídas utilizando fibras especiais de outros materiais, como materiais poliméricos e materiais cristalinos. O desempenho das grades obtidas foi satisfatório e atualmente ainda está em fase de desenvolvimento.

Também foram investigadas fibras convencionais, com revestimentos poliméricos especiais, tendo sido observado que o desempenho do sensor para temperatura construído com grades de Bragg em fibras de estrutura especial pode apresentar uma melhora na sensibilidade, indo de $0,01 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ para $0,5 \text{ nm}/^\circ\text{C}$.

1.3.8 Sensores elétricos e magnéticos

Os sensores a fibra óptica, por causa de sua natureza dielétrica inerente, são uma escolha atraente para a medida de campos elétricos, campos magnéticos e corrente elétrica. Eles fornecem uma isolação galvânica da cabeça do sensor do potencial a terra e são menos sensíveis à interferência eletromagnética.

Quanto ao tamanho, são diretamente proporcionais ao nível de tensão a ser medido, e fornecem uma segurança superior se comparados aos medidores convencionais. Quase todos os sensores de campo elétrico baseados em sistema de fibra óptica são dispositivos híbridos; isto é, a fibra é unida ou incorporada a algum outro material, sensível ao campo elétrico, e usada como meio para monitorar todas as alterações nesse material, quando submetido a campos elétricos. Isso é necessário para campos elétricos, por que a simetria de inversão intrínseca na matriz do vidro da fibra óptica impossibilita um efeito de Pockels (36; 37).

Conseqüentemente, a fibra é tipicamente usada para detectar variações dimensionais de um material piezoelétrico na presença de campos elétricos. Dependendo do nível de sensibilidade desejado, a leitura de saída pode ser feita pela medida simples da intensidade, ou por técnicas interferométricas. Devido a sensibilidade da fibra à temperatura, muitos dos trabalhos atuais estão focados em remover ou minimizar essa sensibilidade à temperatura.

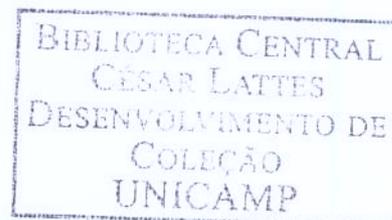
Atualmente os sistemas mais desenvolvidos para medir alta tensão, utilizam sistemas ópticos com uma célula de Pockels como elemento sensor de tensão (36; 37). Para confecção das células, podem ser utilizados diversos materiais que apresentam efeito eletro-óptico, tais como o Niobato de Lítio e o Germanato de Bismuto.

O efeito eletro-óptico é uma propriedade de certos materiais, em fases cristalinas ou poliméricas, de mudarem o valor do índice de refração local $n(E)$ em determinados eixos do cristal ao serem submetidos a um campo elétrico externo, com o eixo do cristal alinhado paralela ou perpendicularmente ao campo elétrico.

O campo aplicado altera o índice de refração de um dos três eixos do cristal, sendo que os demais permanecem inalterados, desde que não haja componentes do campo aplicado que possam afetar o $n(E)$ daquele eixo. O índice de refração varia em função do campo elétrico aplicado, e pode ser expresso por uma série:

$$n(E) = n_0 + \alpha E + \beta E^2 + \dots \quad (1.13)$$

onde n_0 é o índice de refração do material sem estar submetido a um campo externo, α e β são os coeficientes do efeito eletro-óptico. O termo αE corresponde ao efeito Pockels, que varia linearmente com o campo elétrico, e o termo βE^2 corresponde ao efeito Kerr (38). Os termos com potência



acima de 3 contribuem de maneira pouco significativa já que o valor dos coeficientes diminuem significativamente para os termos com expoentes maiores do que 2.

1.3.9 Sensores de temperatura

Os sensores de temperatura constituem, provavelmente, a maior classe de sensores ópticos comercialmente disponíveis. Muitos fenômenos físicos diferentes são usados para executar o sensoriamento, cada um com os atributos apropriados para uma aplicação particular. Nenhuma técnica existente pode abranger toda faixa de temperaturas, com as resoluções necessárias para as diferentes aplicações.

As principais técnicas físicas utilizadas são: pirômetros remotos (ou monitoração da radiação do corpo negro), interferômetros FP para medir deslocamentos em um material ou estrutura devido à expansão térmica, espalhamento Raman, e monitoração da absorção e da fluorescência em terras raras.

A faixa de operação para todas estas técnicas é muito grande, com valores relatados de -50 a 1.000 °C. A sensibilidade pode estar em torno de ± 1 °C, podendo chegar a níveis 100 vezes melhores, utilizando as técnicas mais novas.

As aplicações incluem a monitoração de temperatura nas empresas de energia elétrica, em infra-estruturas civis, em plantas nucleares, nas plantas de manufaturas de aço, nas minas e em grandes ambientes. Nas infra-estruturas civis, os sensores de temperatura estão sendo utilizados em pontes, túneis, dutos, e para monitorar a temperatura de cura do concreto, para que se possa obter a melhor resistência estrutural na construção de represas e de edifícios.

1.3.10 Sensores disponíveis no mercado

Nas buscas realizadas constatou-se que, atualmente, várias empresas estão comercializando uma grande variedade de sensores ópticos para os parâmetros abordados na Tabela 1.6. Dentre os produtos e sistemas disponíveis no mercado que utilizam sensores ópticos para medição de temperatura, tensão e corrente, destacam-se os produtos fabricados pelas seguintes empresas:

- Nxtphase Corporation: é uma empresa canadense que foi formada pela associação da Honeywel (sensores ópticos de corrente para aplicação militar e aeroespacial baseados em "Gyros") e a Carmanah (células de Pockels ópticas integradas para aplicação em tecnologia de sensoriamento de tensão), visando o desenvolvimento de soluções para medição de tensão e corrente em TC's e TP's das empresas de energia elétrica.

- RITZ Instrument Transformers: é uma empresa de origem alemã, tradicional na fabricação e desenvolvimento de instrumentação para medição de tensão e corrente em TC's e TP's para as empresas de energia elétrica.
- OPTISENSE Network: é uma empresa estadunidense que desenvolveu um sensor eletro-óptico de alta tensão, sem a utilização do gás SF₆.
- FISO Technologies Incorporated: é uma empresa canadense associada ao grupo ROCTEST Group Company Ltd. A FISO fabrica e comercializa sensores de fibras ópticas para medição de parâmetros tais como: temperatura, pressão, tensão mecânica, deslocamento e força&carga. A FISO dispõe de um sistema para medição de temperatura que foi desenvolvido especificamente para medição em transformadores utilizados nas empresas de energia elétrica.

Capítulo 2

Sensor óptico de alta tensão

2.1 Introdução

Conforme descrito no Capítulo 1, quase todos os sensores de campo elétrico baseado em sistema de fibra óptica são dispositivos híbridos, isto é, a fibra é unida ou incorporada a algum outro material, sensível ao campo elétrico, e usada como meio para monitorar alterações nesse material, quando submetidos a campos elétricos. As técnicas ópticas empregadas no sensoreamento, utilizando fibras, baseiam-se na medição de diferentes parâmetros característicos da luz guiada pela fibra tais como: intensidade, comprimento de onda, polarização e fase. Neste trabalho, utilizou-se a intensidade da luz para medir a tensão elétrica, usando-se uma técnica particular de sensoreamento, com base na tecnologia de rede de Bragg em fibra óptica, a fim de facilitar o sistema de interrogação do sensor. Neste capítulo, será comentado o desenvolvimento do sensor óptico de alta tensão, mostrando o resultado de testes em laboratório, a sua construção e a instalação do dispositivo na rede elétrica do CPqD. Um dos objetivos do projeto era construir um protótipo de sensor de baixo custo e alta confiabilidade, para monitorar o estado ou limiars de Alta Tensão. A partir da análise do estado da arte em sensores de campo elétrico em sistema de fibra óptica para medição de Alta Tensão, constatou-se que o "baixo custo" é relativo, tendo em vista as tecnologias empregadas e as condições de aplicação (1), entretanto os estudos foram orientados na busca de soluções mais simples que pudessem ser adequadas aos objetivos do projeto.

2.2 Desenvolvimento do sensor de tensão

Foram estudadas e discutidas várias possibilidades para montagem de um dispositivo de sensoria-mento de tensão, utilizando-se um material piezoelétrico como transdutor para detectar campos elétri-cos e fixando-se, paralelamente ao eixo de deformação, uma fibra óptica com propriedades especí-

ficas para sensoriamento, com objetivo de detectar variações dimensionais do material piezoelétrico quando submetido a presença de campos elétricos, resultando na proposta para se construir a configuração básica do dispositivo descrita a seguir.

2.2.1 Montagem do protótipo exploratório

O dispositivo sensor foi montado com base no princípio de utilização de um material piezoelétrico como transdutor para detectar campos elétricos. Fixou-se paralelamente ao eixo de deformação uma Grade de Bragg, fibra óptica com propriedades específicas para sensoriamento, com objetivo de detectar variações dimensionais do material piezoelétrico, quando submetido à presença de campos elétricos. Para sua construção, foi utilizado uma tira cortada a partir de um wafer de cristal piezoelétrico (Niobato de Lítio - LiNbO_3) como base ou substrato, com eletrodos localizados próximo das extremidades. Foi colada uma FBG sobre a base para detectar as mudanças dimensionais. A Figura 2.1 ilustra a montagem do sensor e a Figura 2.2 mostra uma fotografia do protótipo do elemento sensor (40).

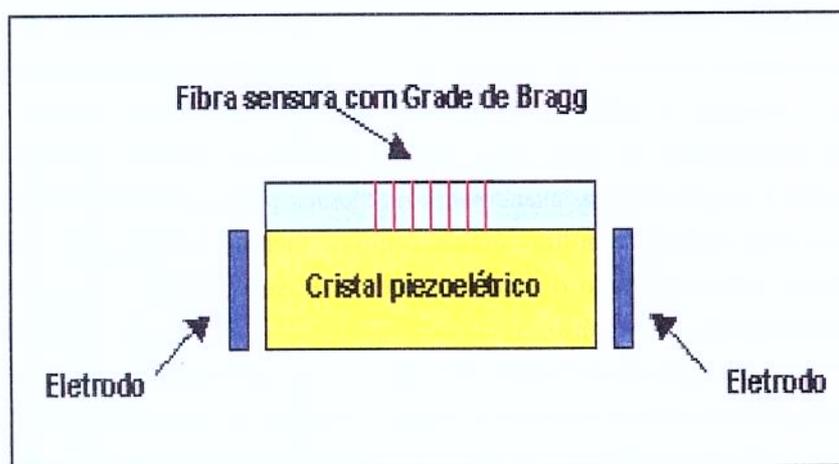


Fig. 2.1: Esquema de montagem do sensor.

2.2.2 Princípio de funcionamento

Antes da apresentação dos resultados obtidos, faz-se necessária uma discussão sobre o princípio de funcionamento e o comportamento esperado para os protótipos dos dispositivos sensores de tensão. Quando aplicado um campo elétrico entre os eletrodos do dispositivo, ou seja, um dos eletrodos é posicionado no condutor com a tensão aplicada e o outro é direcionado para a terra, ocorrem alterações dimensionais no cristal piezoelétrico (Niobato de Lítio) que serão detectadas pela FBG. As



Fig. 2.2: Fotografia do sensor montado.

mudanças dimensionais do cristal são detectadas pela FBG através da aplicação de uma luz Laser num comprimento de onda (λ) específico através da grade (de acordo com a FBG), e a monitoração da intensidade da luz refletida indicará as mudanças dimensionais no cristal em função do campo elétrico. A Figura 2.3 ilustra o espectro de reflexão da FBG do dispositivo sensor sem a presença do campo elétrico, ou seja, sem estar tensionada ou pressionada.

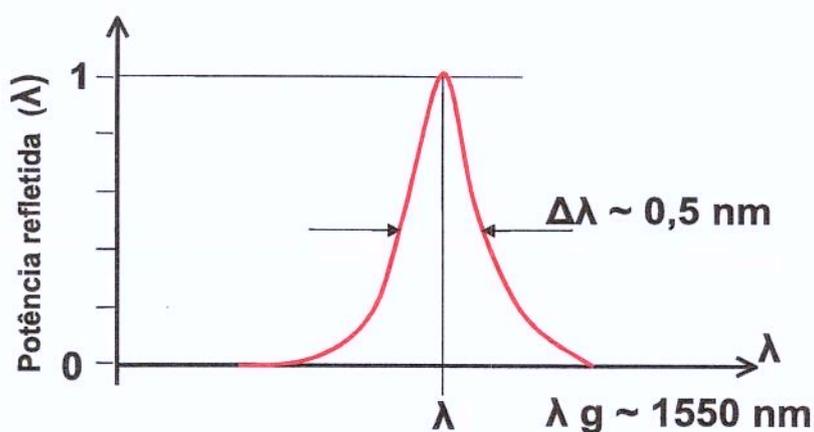


Fig. 2.3: Espectro de Reflexão da FBG sem estar tensionada ou pressionada.

Na Figura 2.4, é ilustrada a condição de operação da FBG, quando o dispositivo sensor estiver submetido ao campo elétrico, sendo apresentado o espectro de reflexão da FBG com tensão ou pressão mecânica, esticado ou comprimido em relação à linha do laser, e o nível de modulação resultante com a fonte laser sintonizada no comprimento de onda igual ao comprimento de onda de reflexão da grade de Bragg $\lambda = \lambda_g$.

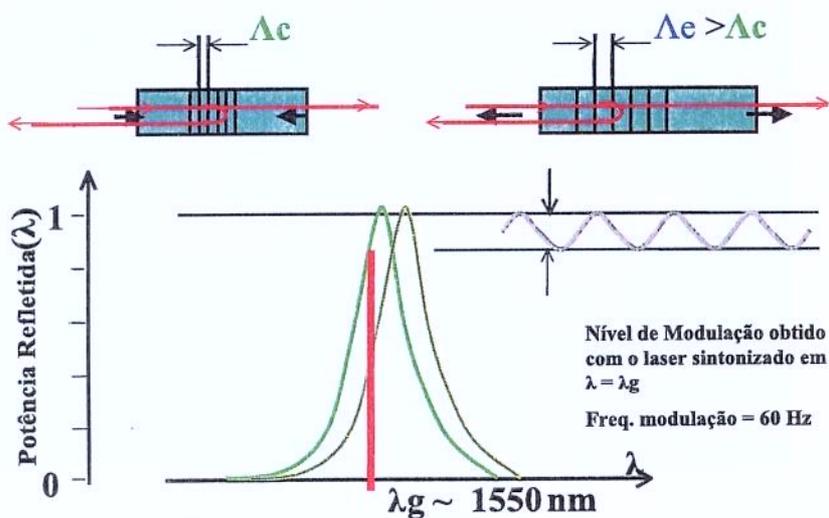


Fig. 2.4: Espectros de reflexão da FBG quando o dispositivo sensor estiver submetido ao campo elétrico.

A Figura 2.5 ilustra a condição de operação da FBG, quando o dispositivo sensor estiver submetido ao campo elétrico, sendo apresentado o espectro de reflexão da FBG com tensão ou pressão mecânica (esticado ou comprimido) em relação à linha do laser e o nível de modulação resultante com a fonte Laser sintonizada no comprimento de onda igual ao ponto "quiescente" do comprimento de onda de reflexão da grade de Bragg $\lambda = \lambda_Q$.

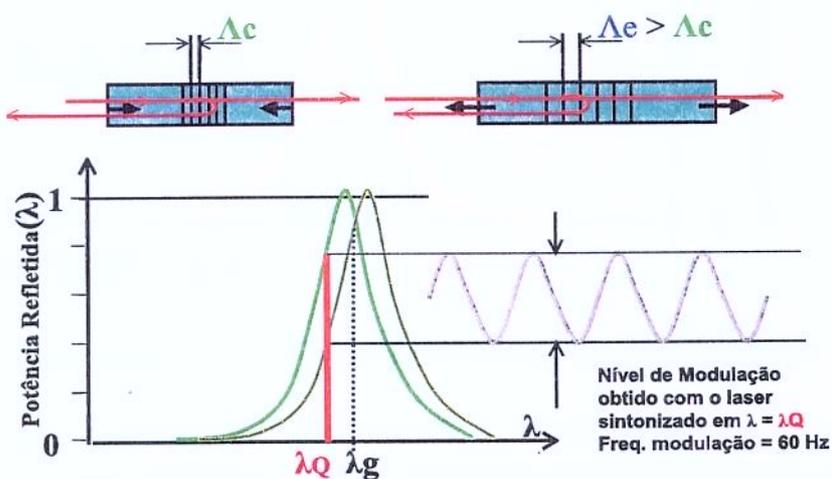


Fig. 2.5: Espectros de reflexão da FBG e o nível de modulação resultante, com o dispositivo submetido ao campo elétrico, com a fonte operando em $\lambda = \lambda_Q$.

2.2.3 Resultados obtidos em laboratório

Foi preparada uma montagem para execução de testes exploratórios nos dispositivos sensores de tensão com o objetivo de verificar a resposta dos sensores quando submetidos ao campo elétrico. Foi utilizada a infra-estrutura do Laboratório de Proteção Elétrica que possui uma facilidade para ensaio de tensão aplicada de até 100 kV CA.

Condições do ensaio:

- Potência óptica: -3 dBm;
- Tempo de estabilização do laser sintonizável: 20min;
- Fotodetector: GM5 (Germânio) integrado ao protótipo do sistema de monitoração, descrito no Relatório Técnico PD 33.ER.TRO.0014A/RT-05-AA 6 (39).

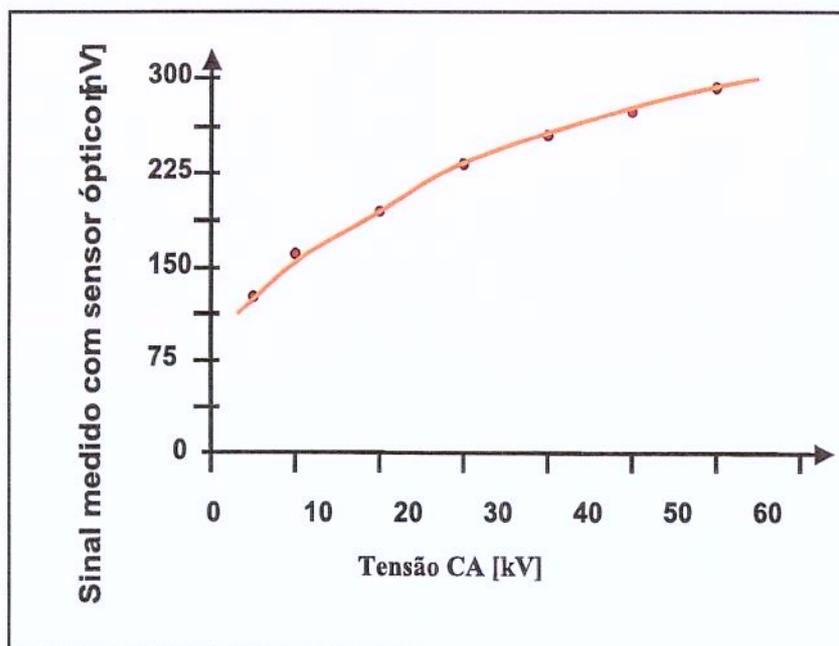


Fig. 2.6: Resultado das medições em laboratório.

Na tabela 2.1 está apresentada as tensões mais comuns utilizadas no sistema de energia elétrica brasileiro.

A figura 2.7 apresenta uma fotografia do sensor colocado em teste no laboratório de proteção elétrica do CPqD (39).

A figura 2.8 mostra o diagrama esquemático do ensaio realizado (39).

GERAÇÃO	6 a 25	kV
TRANSMISSÃO	138, 230, 345, 440, 500, 750	kV
SUB-TRANSMISSÃO	34,5, 69, 88, 138	kV
DISTRIBUIÇÃO PRIMÁRIA	3,8, 6,6, 11,9, 13,2, 13,8, 34,5	kV
DISTRIBUIÇÃO SECUNDÁRIA	127/220, 220/380, 115/230, 220	V

Tab. 2.1: Tensões mais comuns utilizadas no sistema de energia brasileiro.

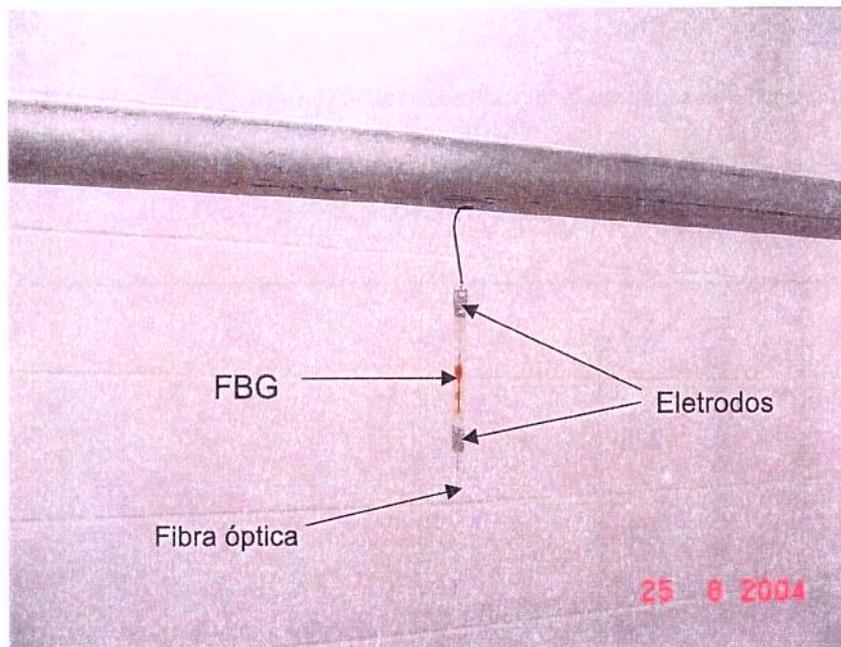


Fig. 2.7: Fotografia do sensor em ensaio de laboratório.

2.2.4 Protótipo do sensor de tensão para a rede de distribuição

O sensor de alta tensão foi encapsulado em material plástico conforme mostra a figura 2.9, para se obter uma proteção mecânica maior e para garantir a estabilidade do campo elétrico sobre o dispositivo sensor.

2.2.5 Montagem do sensor

O sensor mostrado na figura 2.9 foi inserido em uma bucha isoladora para capacitor com tensão de isolamento de 30 kv, fornecida pela fábrica Isoladores Santana. A bucha isoladora está mostrada na figura 2.10. A bucha isoladora foi fixada à uma caixa de alumínio fundida com dimensões de 150x150 mm, com a função de base mecânica para o conjunto e abrigo da emenda óptica da fibra do sensor

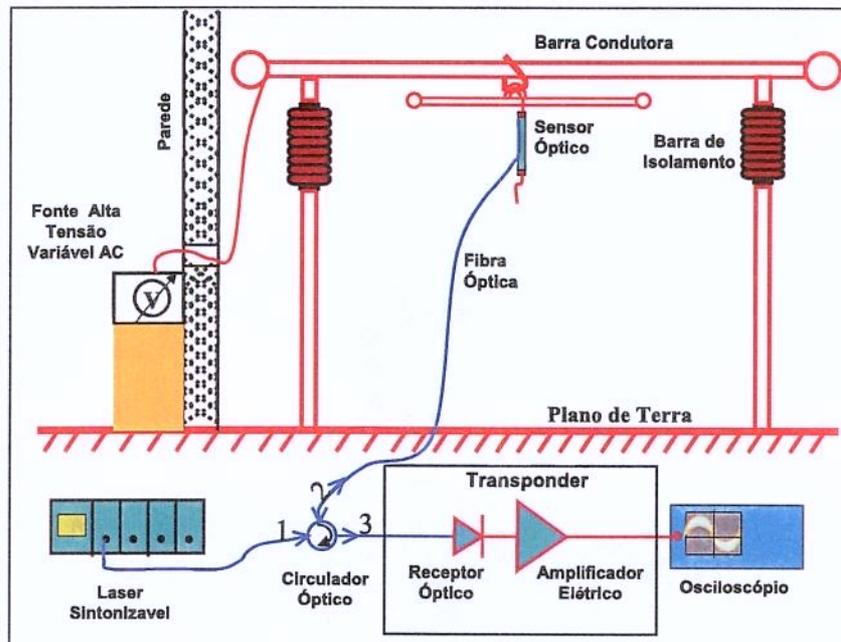


Fig. 2.8: Diagrama esquemático do ensaio em laboratório.

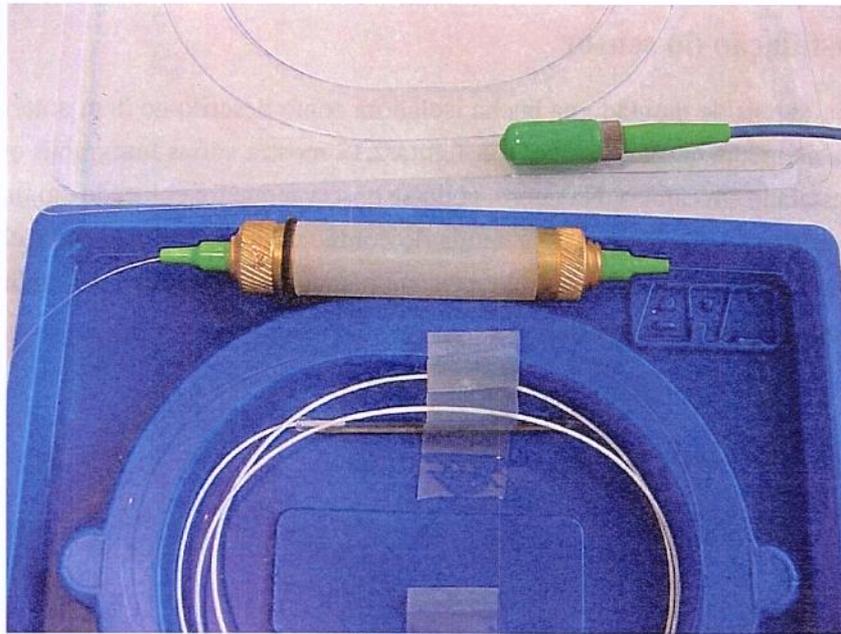


Fig. 2.9: Sensor de alta tensão encapsulado.

com o cordão óptico. A Figura 2.11 apresenta alguns detalhes da montagem do protótipo.

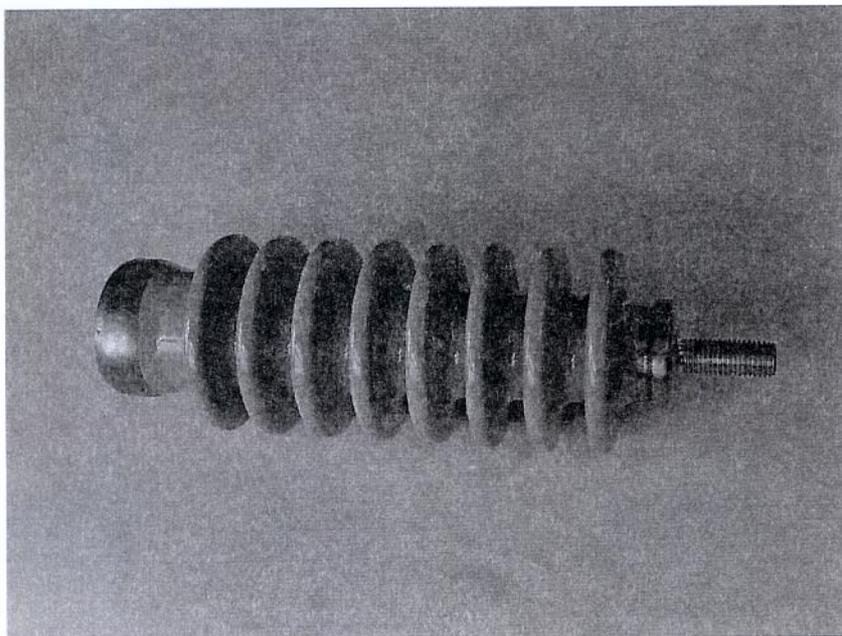


Fig. 2.10: Bucha isoladora.

2.2.6 Instalação do sensor

O sensor, depois de montado na bucha isoladora como descrito no item anterior, foi instalado na rede elétrica de média tensão no CPqD. A figura 2.12 mostra várias fotografias que ilustram como o sensor foi instalado em campo. Na figura, pode-se observar que foi colocado um fusível para proteção. No detalhe está mostrada a caixa de emenda do cordão óptico que chega até a eletrônica, através de duto enterrado. A eletrônica de controle e os equipamentos de medição para interrogação do sensor estão acomodados em um container.

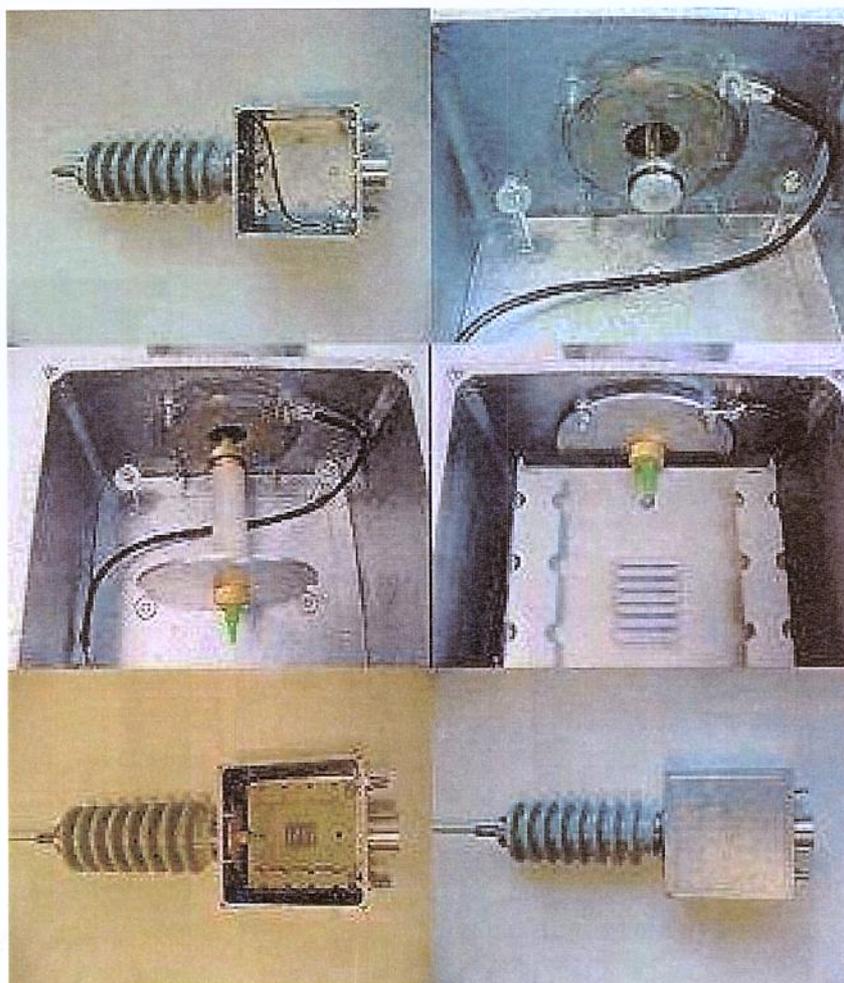


Fig. 2.11: Detalhes da montagem do sensor de tensão.

sensor foi instalado em campo. Na figura, pode-se observar que foi colocado um fusível para proteção. No detalhe está mostrada a caixa de emenda do cordão óptico que chega até a eletrônica, através de duto enterrado. A eletrônica de controle e os equipamentos de medição para interrogação do sensor estão acomodados em um container.



Fig. 2.12: Detalhes da instalação do sensor.

Capítulo 3

Circuitos eletrônicos e testes

3.1 Introdução

Neste capítulo será comentado o desenvolvimento dos circuitos eletrônicos que fazem a transdução e processamento dos sinais ópticos proveniente do sensor de tensão, a interrogação do sensor. Será descrito também a metodologia utilizada para o desenvolvimento do firmware e o circuito eletrônico do driver de laser. A fibra óptica tem muitas características que a fazem apropriada para o uso como um sensor totalmente passivo. Um sensor passivo é aquele que não requer energia elétrica na região de sensoriamento. A vantagem mais importante das fibras ópticas é o fato de serem fabricadas de materiais dielétricos, como a sílica e plásticos, possibilitando que os sensores a fibra óptica sejam empregados em ambiente perigosos, em que as utilizações de sensores elétricos convencionais não são adequadas. Os sensores a fibra óptica são especialmente indicados para operarem em ambientes que requerem isolamento elétrica, tendo em vista que em geral, os sensores ópticos são imunes aos efeitos da interferência eletromagnética (EMI) encontrados em ambientes eletricamente ruidosos, tornando-se altamente vantajosos para as aplicações nos sistemas de sensoriamento utilizados pelas empresas de energia elétrica. Partindo deste pressuposto, desenvolveu-se um sensor óptico de alta tensão, capaz de monitorar a rede elétrica de média, com boa resolução. A grandeza sensoreada é transmitida para os circuitos eletrônicos através de uma fibra óptica. A eletrônica processa a informação do sensor, realiza cálculos da tensão RMS e da tensão de pico, enviando o resultado através de um modem e utilizando o protocolo DNP 3 para um sistema centralizado de supervisão de falta de energia elétrica.

3.2 Sistema de sensoriamento

Com o objetivo de informar o estado de operação da rede de energia elétrica especificamos o sistema de sensoriamento de falta de energia. Este sistema é composto das seguintes partes:

- Elemento sensor;
- *Transponder*;
- Processamento;
- Modem celular;
- Sistema de energia alternativa
- Sistema centralizado de supervisão de falta de energia elétrica.

É interessante observar que o sistema deve funcionar em condições de falta de energia elétrica, daí a necessidade de alimentação dos circuitos eletrônicos com energia alternativa (solar). Os sensores serão instalados preliminarmente em postes de média tensão (13,8KV), na proximidade de um transformador abaixador de tensão. A figura 3.1 mostra o diagrama esquemático do sistema de sensoriamento (51).

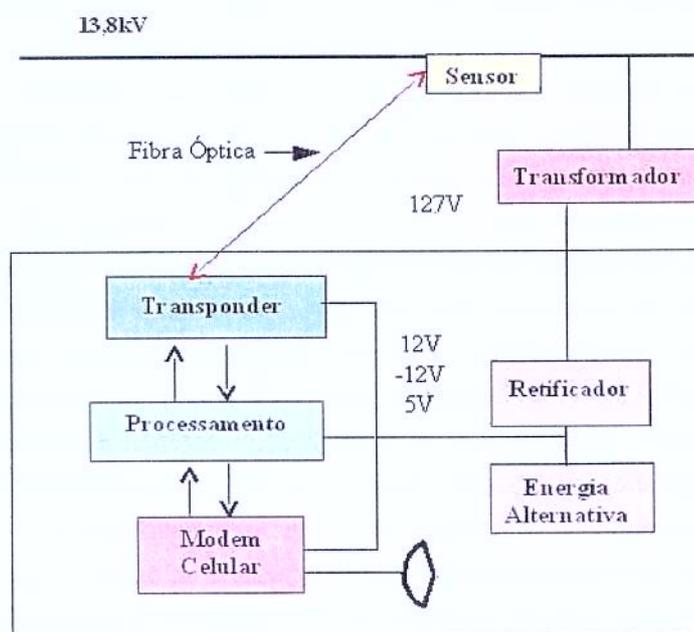


Fig. 3.1: Sistema de sensoriamento.

3.3 Sinal de entrada

O sinal óptico proveniente do sensor de tensão possui uma componente DC, que é muito maior que a componente AC, que contém a informação da tensão elétrica medida, como mostra a figura 3.2. Da figura 3.2 podemos ver que a componente do sinal que contém a informação é cerca de 3000 vezes menor que a componente DC do sinal, o que dificulta muito a detecção da informação de tensão contida no sinal. A dificuldade está em aplicar-se uma amplificação seletiva, somente na componente que contém a informação de interesse.

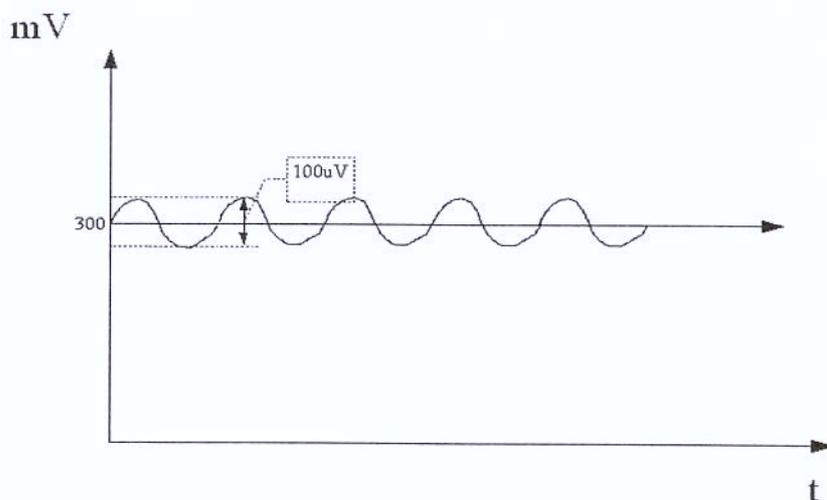


Fig. 3.2: Forma de onda do sinal de entrada.

3.4 Primeira solução apresentada para o amplificador de transimpedância

Nesta solução, amplificava-se o sinal com as duas componentes, AC e DC. Isso acarretava em um amplificador de transimpedância com um ganho pequeno, pois o nível de sinal DC é muito grande comparado com o nível do sinal AC. Um ganho grande no sinal de entrada provoca não linearidade da saída, acarretando em distorções. Como o ganho de transimpedância tinha que ser pequeno, foi necessário mais um estágio de amplificação, Como mostra a figura 3.3.

O sinal DC presente no sinal amplificado é desacoplado por um capacitor, o sinal AC é amplificado e filtrado. A figura 3.4 mostra este circuito. A placa projetada para o receptor contém vários *jumpers* que possibilita diversas configurações no circuito receptor. Os *jumpers* possibilitam, por exemplo, retificar o sinal detectado, filtrar ou não. Estas facilidades projetadas mostraram-se bastante

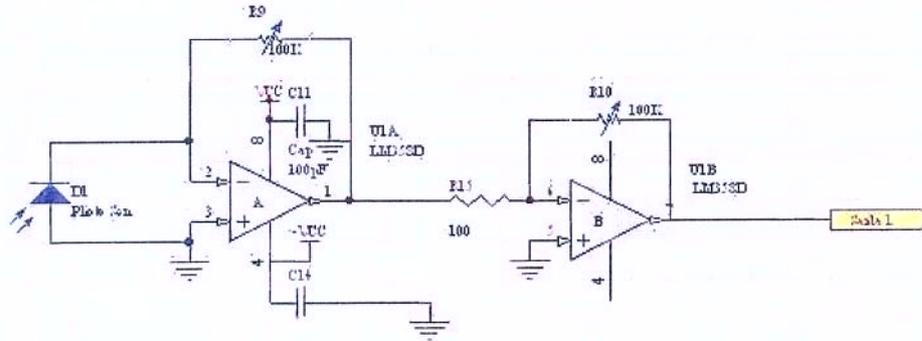


Fig. 3.3: Amplificador de transimpedância com mais um estágio amplificador.

eficientes para chegarmos a uma configuração final do receptor. Optou-se por deixar o sinal com as componentes de ruído para uma posterior análise das componentes harmônicas. Esta técnica de análise das harmônicas é muito utilizada para se avaliar a qualidade da energia, que a concessionária está entregando. A figura 3.4 ilustra o esquema elétrico do terceiro estágio de amplificador e filtro e a figura 3.5 mostra uma foto da placa analógica montada inicialmente.

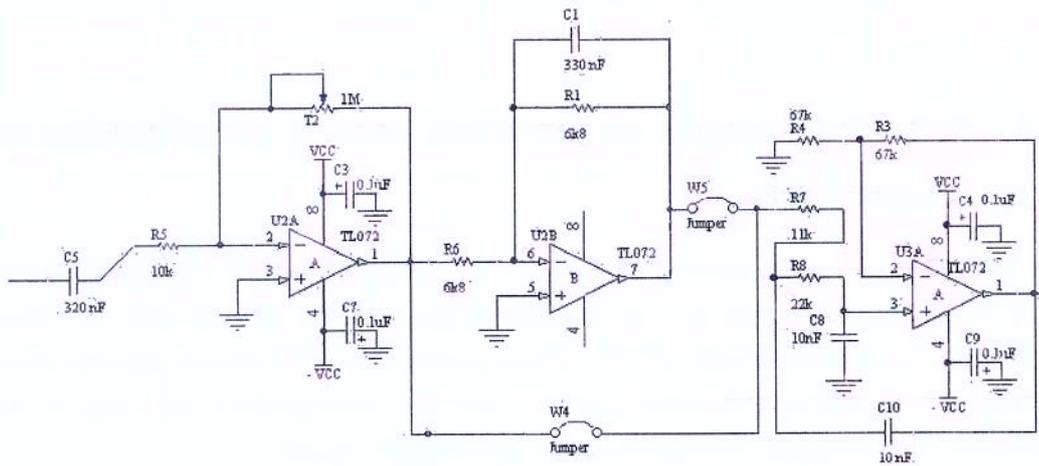


Fig. 3.4: Terceiro estágio de amplificador e filtro.



Fig. 3.5: Primeira placa projetada para desenvolvimento do receptor.

3.5 Transimpedância com malha T

O circuito detector é muito importante para se fazer uma boa medição do sinal elétrico. Foi apresentado no ítem 3.4 um amplificador de transimpedância que foi inicialmente projetado para o detector do sensor de tensão. Foi realizado um estudo mais aprofundado sobre amplificadores de transimpedância, no sentido de melhorar o desempenho do receptor óptico. Para resolver o problema de detecção de um sinal com uma componente AC pequena e uma componente DC grande, foi projetado um circuito amplificador de transimpedância com malha de realimentação T (41; 42). A figura 3.6 mostra o circuito implementado

Foi selecionado um operacional com entrada JFET, que tem um comportamento superior com relação a ruído, uma corrente de ruído de entrada de $0,01 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ e uma corrente de polarização de entrada de 50 pA , que praticamente não provoca nenhuma interferência no sinal do fotodiodo. Além disto, este amplificador operacional possui pinos para ajuste da tensão de offset, o que possibilita uma redução dos erros na tensão de saída ocasionados pela tensão de offset de entrada. Na figura 3.7 temos uma foto do circuito de transimpedância montada.

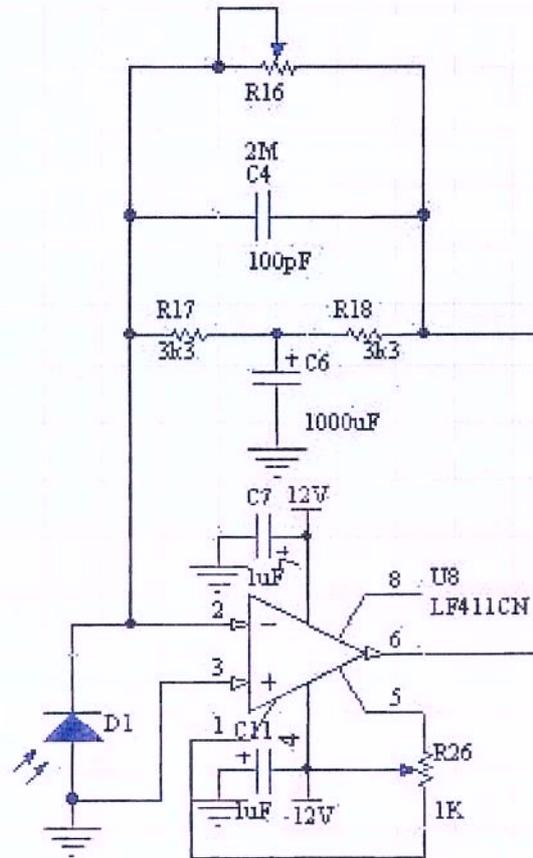


Fig. 3.6: Amplificador de transimpedância com malha T.

3.5.1 Resultados simulados

O circuito da figura 3.6 foi simulado utilizando o simulador Tina da Texas Instruments cujo resultado está apresentado na figura 3.8, para um sinal de entrada com frequência de 60 Hz, com amplitude DC de 300 mV e amplitude AC de 100 uV.

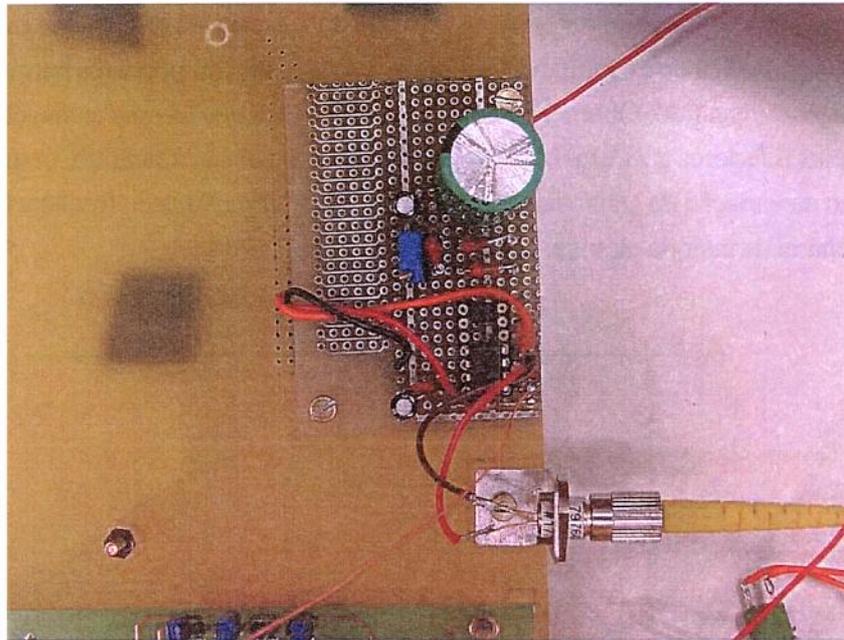


Fig. 3.7: Protótipo do circuito de transimpedância.

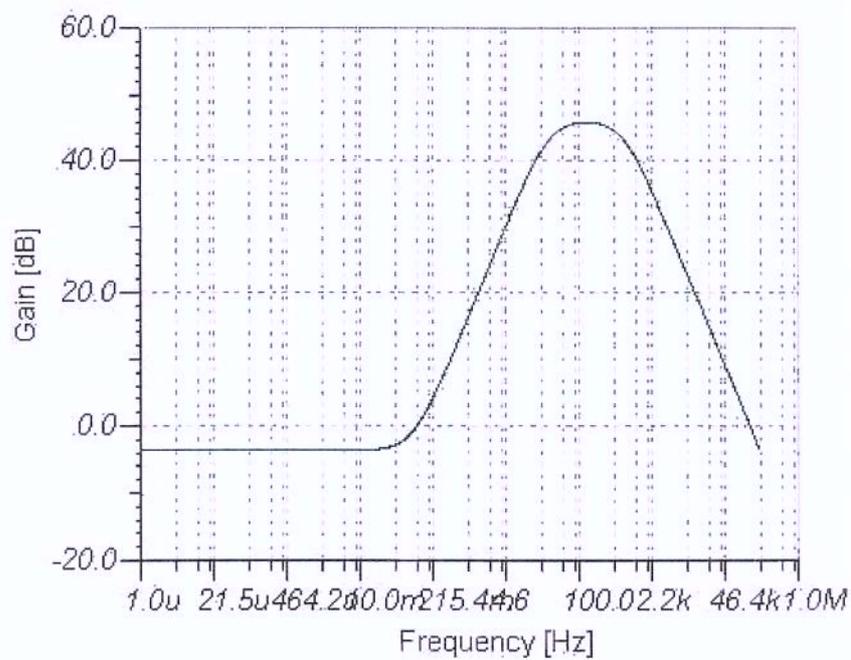


Fig. 3.8: Resultado do simulador para o circuito de transimpedância com malha T.

Da figura 3.8 pode-se observar que o maior ganho do sinal está na faixa de interesse para análise do sinal elétrico medido, possibilitando inclusive a análise de componentes harmônicos presentes no sinal de alta tensão medido. Observa-se também da figura 3.8 que há uma atenuação das componentes de frequências inferiores a 215 mHz. A figura 3.9 mostra o sinal expandido, permitindo uma melhor visualização da variação do ganho de tensão do amplificador na faixa de frequências de interesse para a concessionária de energia elétrica.

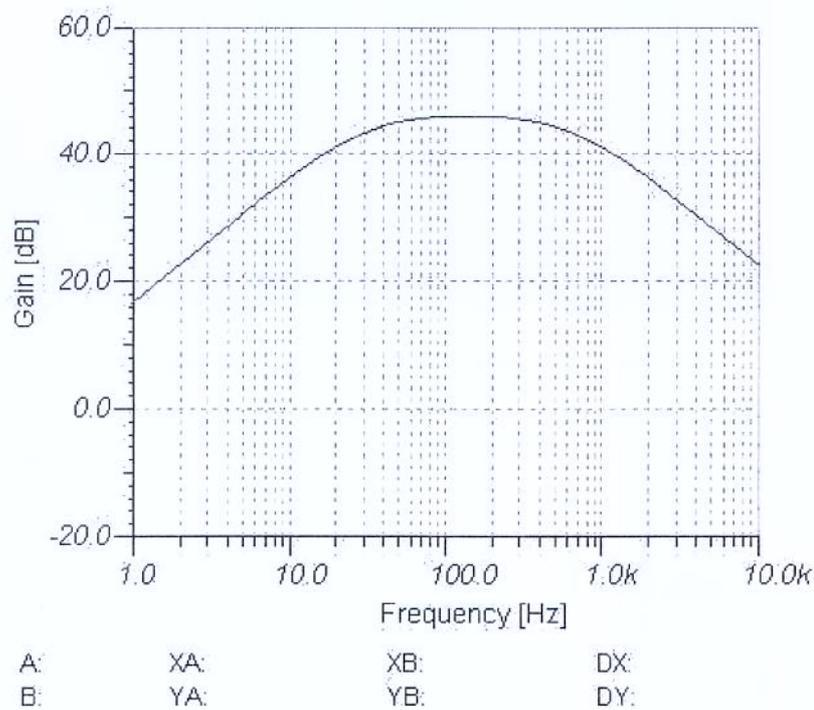


Fig. 3.9: Resultado do simulador para o circuito de transimpedância com malha T em outra escala de frequências.

A figura 3.10 mostra a forma de onda da saída do amplificador transimpedância, para um sinal de 7,5 KV aplicado ao sensor de tensão no laboratório.

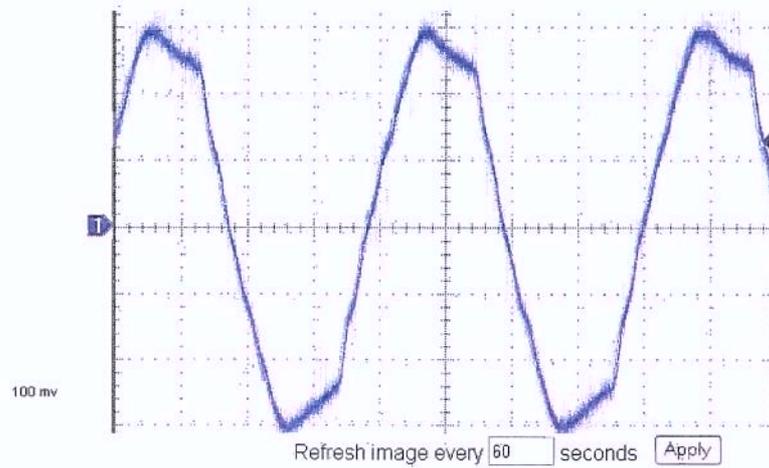


Fig. 3.10: Forma de onda de saída do amplificador transimpedância.

3.6 Filtro passa baixas de segunda ordem VCVS

Como o nome diz, este filtro deixa passar os sinais com frequências inferiores a uma dada frequência de corte, no caso deste projeto 1 kHz, e barra os sinais de frequência superiores à frequência de corte. O filtro selecionado foi o filtro ativo de segunda ordem VCVS. VCVS significa "Voltage Controlled Voltage Source", Estrutura de Fonte de Tensão Controlada por Tensão. As principais características são:

- Boa estabilidade
- Baixa impedância de saída
- Facilidade de ajuste de ganho e de frequência
- Requer poucos componentes externos

Para estas estruturas o fator Q é da ordem de 10 no máximo. O filtro a seguir é do tipo passa baixas de segunda ordem utilizando estrutura VCVS, ganho 2, frequência de corte de 1Khz e resposta tipo Butterworth. A figura 3.11 apresenta o diagrama esquemático do filtro.

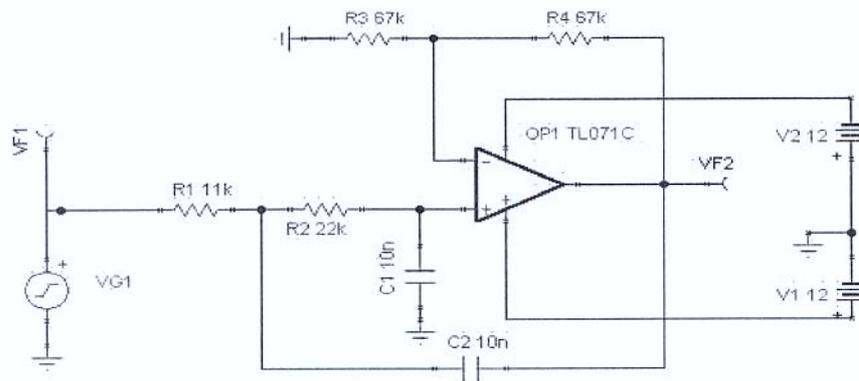


Fig. 3.11: Esquema do filtro.

3.6.1 Equações de projeto

As equações utilizadas no projeto estão apresentadas abaixo.

$$K = 1 + R4/R3 \quad (3.1)$$

$$R1 = 2/[aC2 + \sqrt{[a^2 + 4b(K - 1)C2^2 - 4bC1C2]}W \quad (3.2)$$

$$R2 = 1/bC1C2R1Wc^2 \quad (3.3)$$

$$R3 = K(R1 + R2)/(K - 1) \quad (3.4)$$

Para $K > 1$

$$R4 = K(R1 + R2) \quad (3.5)$$

Os parâmetros a e b são obtidos da tabelas (46).

Para $K = 2$ temos: $a = 1,414214$ e $b = 1$.

$C2$ deve ser escolhido sendo um valor prático próximo de $10/fc$.

$C2 = 0,01 \mu F$ para a frequência de 1 kHz. O valor de $C1$ é dado por:

$$C1 \leq [a^2 + 4b(K - 1)]C2/4b \quad (3.6)$$

$C1 = 0,01 \mu F$ para a frequência de 1 kHz Os resistores foram calculados utilizando as equações 2,3,4 e 5. Os resultados $R1 = 11,25 K\Omega$, $R2 = 22,5 K\Omega$, $R3 = 67,5 K\Omega$ e $R4 = 67,5 K\Omega$

3.6.2 Simulação do Filtro

O circuito do filtro apresentado na figura 3.11 foi simulado utilizando o simulador TINA da Texas Instruments. O sinal de entrada utilizado para a simulação foi uma senoide com frequência de 5 kHz e amplitude de 1 V de pico. Na figura 3.12 está apresentado o resultado da simulação do filtro.

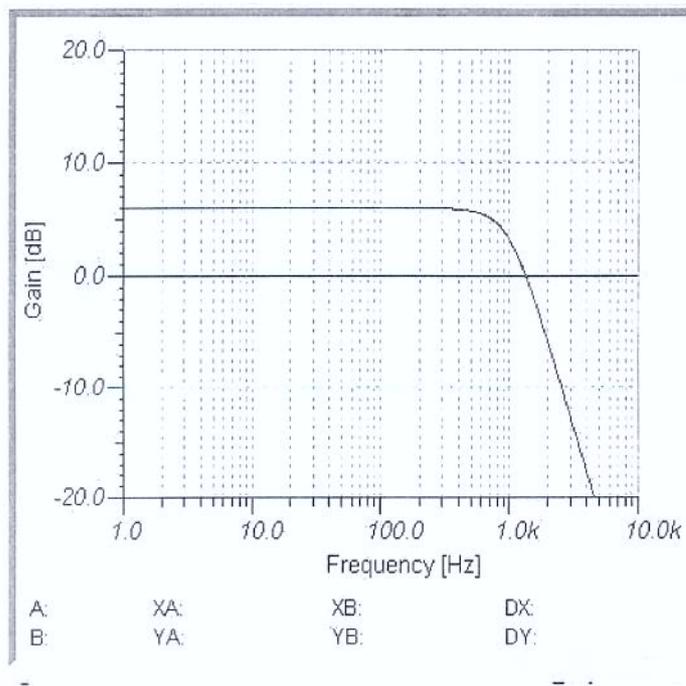


Fig. 3.12: Simulação do filtro.

3.7 Estágio de saída analógica

Por fim, o sinal detectado antes de ser aplicado no circuito de amostragem e retenção, passa por mais dois estágios amplificadores necessários para se ter duas saídas especificadas, uma com amplitude variando de + 5 V até - 5V e a outra saída variando entre + 10V e - 10 V, como mostra a figura 3.13.

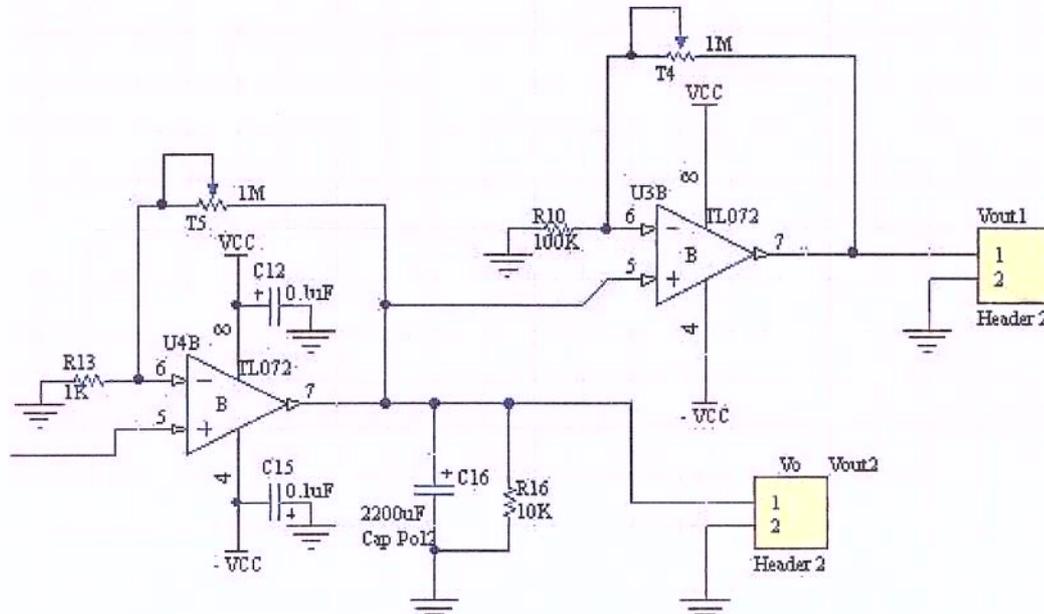


Fig. 3.13: Estágio de saída.

3.8 Circuito receptor completo

A figura 3.14 ilustra o circuito receptor completo. Foi implementado na placa um filtro ativo passa baixas com frequência de corte de 1 KHz. A placa possui *jumpers* que possibilitam inserir ou retirar o filtro do circuito receptor. Note que o estágio de saída descrito anteriormente está presente no circuito receptor.

3.9 Driver de laser

O sistema para controlar o laser é composto por dois circuitos eletrônicos, um para controlar a quantidade de corrente que é fornecida para o laser e outro para controlar a temperatura que o componente semiconductor opera. Através do controle da temperatura do laser podemos controlar o comprimento de onda de emissão. O dispositivo laser utilizado é o FLD5F6CX-E36, da EUDYNA, com um comprimento de onda de 1551,8 nm. A figura 3.15 mostra o diagrama esquemático do circuito de driver do laser.

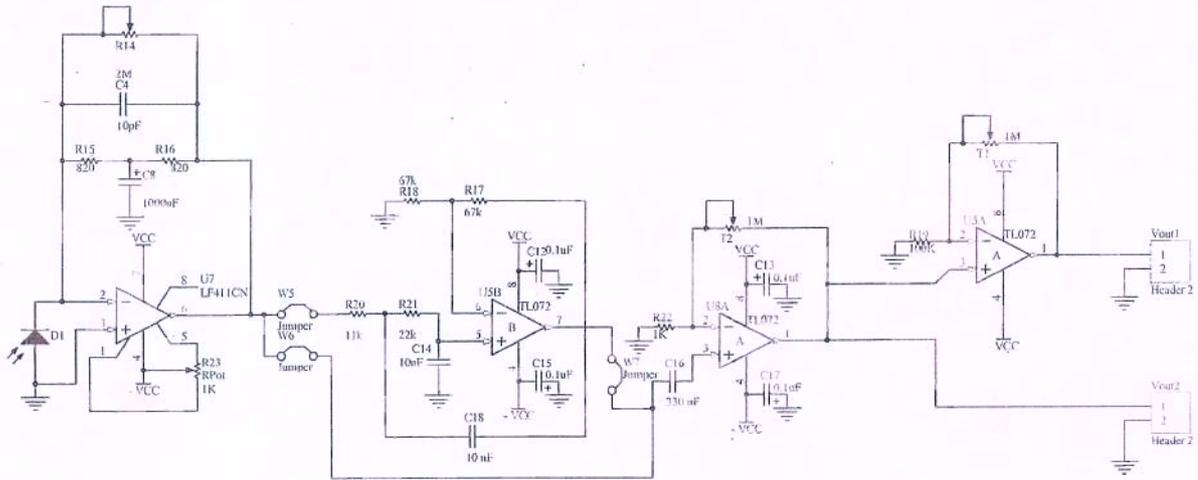


Fig. 3.14: Circuito receptor completo.

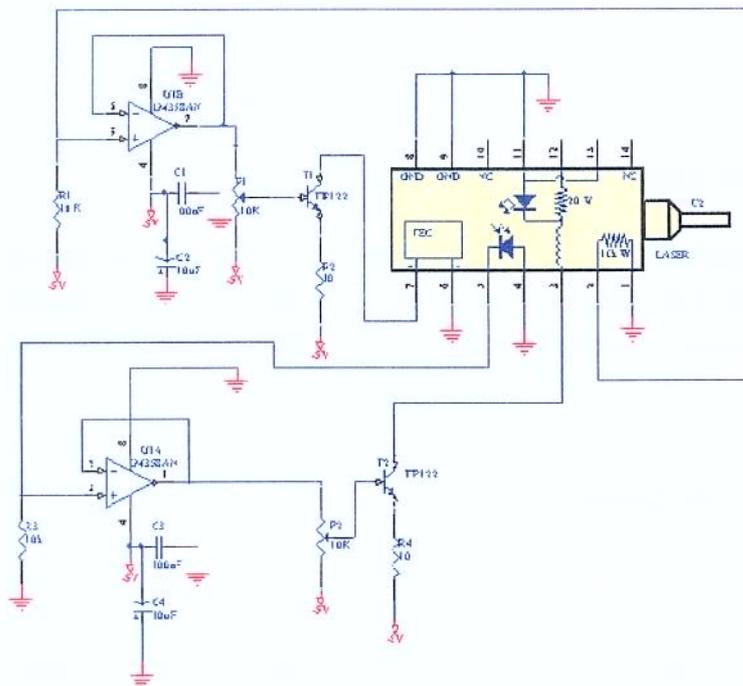


Fig. 3.15: Circuito eletrônico do driver de laser.

3.10 Aquisição de dados

Para a aquisição do sinal foi utilizado um circuito conversor analógico digital de 12 bits, bipolar. Este circuito pode receber sinais analógicos com amplitude de até $\pm 20\text{v}$. O tempo de conversão é de

$35 \mu\text{s}$. Foi realizada a aquisição de 40 amostras por ciclo do sinal. A frequência do sinal amostrado é de 60 Hz, com um período de 16,67 ms. Dividindo 16,67 ms por 40 temos $416,7 \mu\text{s}$ que é o tempo entre duas amostras. A frequência de amostragem é $1/416,7$, que é de 2,4 KHz. O circuito integrado conversor analógico digital utilizado foi o AD 574, que é de 12 bits. Que dá uma precisão de medida de 4,8 mv para a entrada de $\pm 20\text{v}$ e 2,4 mv para a entrada de $\pm 10 \text{v}$. A figura 3.16 mostra o conversor AD de 12 bits utilizado.

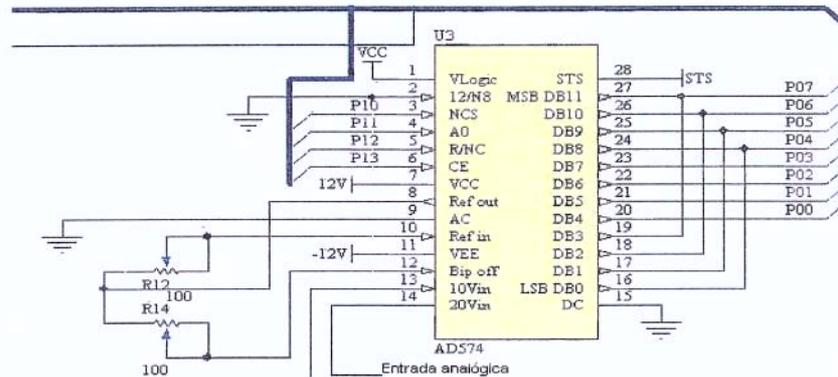


Fig. 3.16: Circuito conversor analógico digital.

3.11 Processamento

Dividiu-se o processamento digital de sinal em dois processadores, deixou-se um microcontrolador para a aquisição de dados e utilizou-se um microcomputador tipo PC104 para o cálculo do valor máximo do sinal, valor RMS e para o processamento do protocolo DNP 3.0. O circuito microcontrolador e conversor analógico digital estão mostrados na figura 3.17. Para controlar a aquisição de dados foi utilizado o microcontrolador AT89S8252 da atmel. As funções deste microcontrolador são:

- Controlar a aquisição de dados
- Realizar uma média de 10 curvas de 40 pontos
- Gerar a frequência de 2,4 khz para a aquisição de dados
- Ler 40 amostras do sinal
- Interpretar os comandos provenientes da placa do microcomputador PC104
- Fornecer os dados para a porta paralela do PC 104

- Fornecer a temporização para que o PC 104 possa ler os dados corretamente

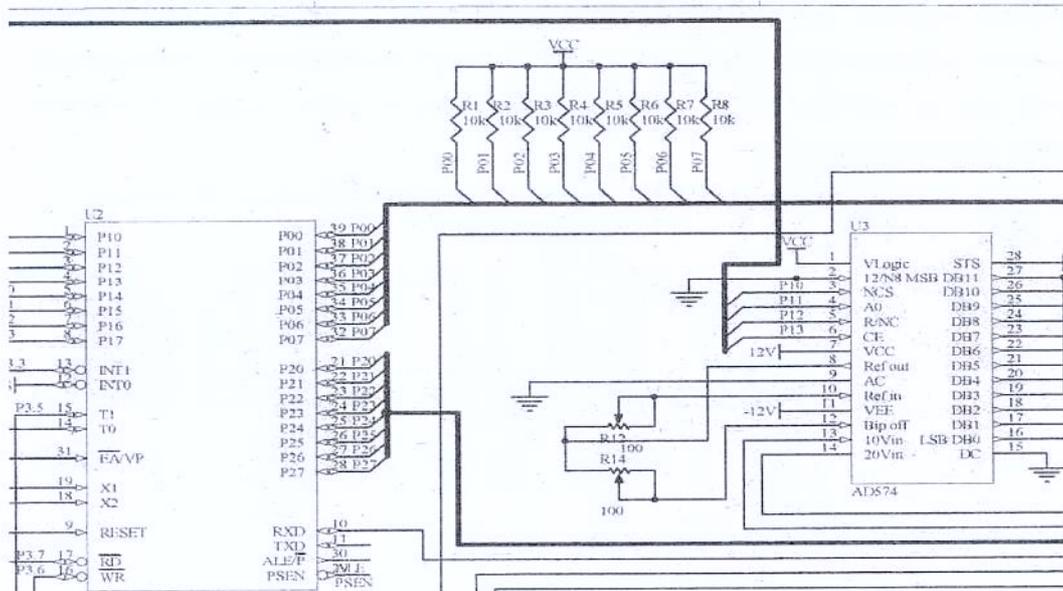


Fig. 3.17: Circuito microcontrolador e conversor analógico digital.

Cada placa de sensor possui um endereço, o microcomputador PC 104 envia um sinal de comando para o sensor enviar os dados da curva. O microcontrolador lê o comando e se for para o seu sensor, libera os circuitos tri-state para que a os sinais da curva digitalizada possam ser conectados à porta paralela do PC104. A figura 3.18 mostra um diagrama de blocos da placa do sensor.

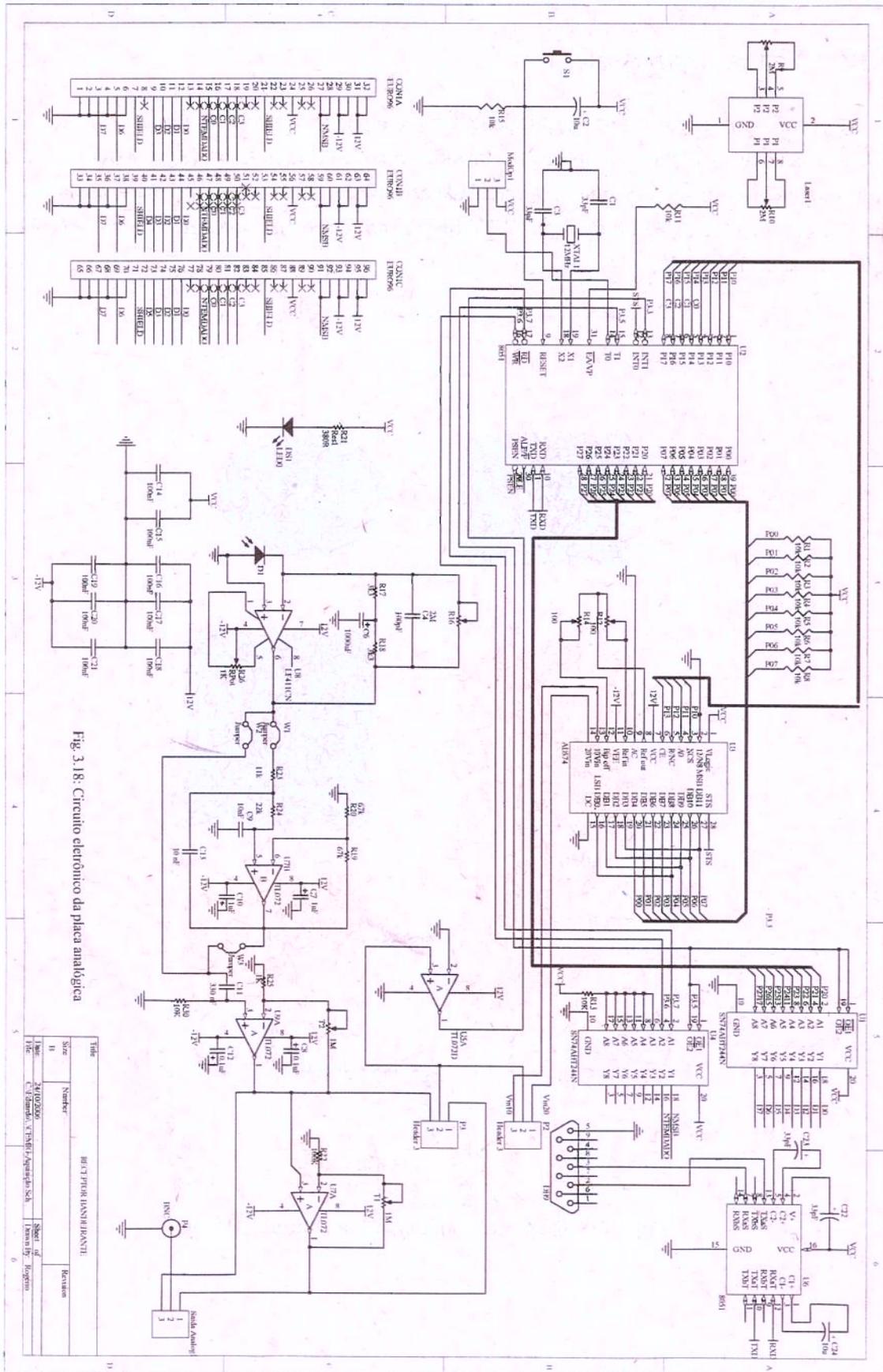


Fig. 3.18: Circuito eletrônico da placa analógica

Item	Quantidade	Descrição	Observações
1	1	Placa Analógica	
2	1	Resistor 10k	
3	1	Resistor 1k	
4	1	Resistor 100k	
5	1	Resistor 100Ω	
6	1	Resistor 10k	
7	1	Resistor 1k	
8	1	Resistor 100k	
9	1	Resistor 100Ω	
10	1	Resistor 10k	
11	1	Resistor 1k	
12	1	Resistor 100k	
13	1	Resistor 100Ω	
14	1	Resistor 10k	
15	1	Resistor 1k	
16	1	Resistor 100k	
17	1	Resistor 100Ω	
18	1	Resistor 10k	
19	1	Resistor 1k	
20	1	Resistor 100k	
21	1	Resistor 100Ω	
22	1	Resistor 10k	
23	1	Resistor 1k	
24	1	Resistor 100k	
25	1	Resistor 100Ω	
26	1	Resistor 10k	
27	1	Resistor 1k	
28	1	Resistor 100k	
29	1	Resistor 100Ω	
30	1	Resistor 10k	
31	1	Resistor 1k	
32	1	Resistor 100k	
33	1	Resistor 100Ω	
34	1	Resistor 10k	
35	1	Resistor 1k	
36	1	Resistor 100k	
37	1	Resistor 100Ω	
38	1	Resistor 10k	
39	1	Resistor 1k	
40	1	Resistor 100k	
41	1	Resistor 100Ω	
42	1	Resistor 10k	
43	1	Resistor 1k	
44	1	Resistor 100k	
45	1	Resistor 100Ω	
46	1	Resistor 10k	
47	1	Resistor 1k	
48	1	Resistor 100k	
49	1	Resistor 100Ω	
50	1	Resistor 10k	
51	1	Resistor 1k	
52	1	Resistor 100k	
53	1	Resistor 100Ω	
54	1	Resistor 10k	
55	1	Resistor 1k	
56	1	Resistor 100k	
57	1	Resistor 100Ω	
58	1	Resistor 10k	
59	1	Resistor 1k	
60	1	Resistor 100k	
61	1	Resistor 100Ω	
62	1	Resistor 10k	
63	1	Resistor 1k	
64	1	Resistor 100k	
65	1	Resistor 100Ω	
66	1	Resistor 10k	
67	1	Resistor 1k	
68	1	Resistor 100k	
69	1	Resistor 100Ω	
70	1	Resistor 10k	
71	1	Resistor 1k	
72	1	Resistor 100k	
73	1	Resistor 100Ω	
74	1	Resistor 10k	
75	1	Resistor 1k	
76	1	Resistor 100k	
77	1	Resistor 100Ω	
78	1	Resistor 10k	
79	1	Resistor 1k	
80	1	Resistor 100k	
81	1	Resistor 100Ω	
82	1	Resistor 10k	
83	1	Resistor 1k	
84	1	Resistor 100k	
85	1	Resistor 100Ω	
86	1	Resistor 10k	
87	1	Resistor 1k	
88	1	Resistor 100k	
89	1	Resistor 100Ω	
90	1	Resistor 10k	
91	1	Resistor 1k	
92	1	Resistor 100k	
93	1	Resistor 100Ω	
94	1	Resistor 10k	
95	1	Resistor 1k	
96	1	Resistor 100k	
97	1	Resistor 100Ω	
98	1	Resistor 10k	
99	1	Resistor 1k	
100	1	Resistor 100k	

3.12 Placa analógica

Os circuitos descritos acima foram montados em uma única placa. A figura 3.19 mostra o diagrama esquemático da placa. A figura 3.20 mostra o layout da face A da placa e a figura 3.21 mostra uma fotografia da placa montada. Na realidade esta placa, denominada de placa analógica, possui também um microcontrolador de 8 bits AT89S8252, um conversor analógico digital AD574 e dois buffers tri-state 74HC244.

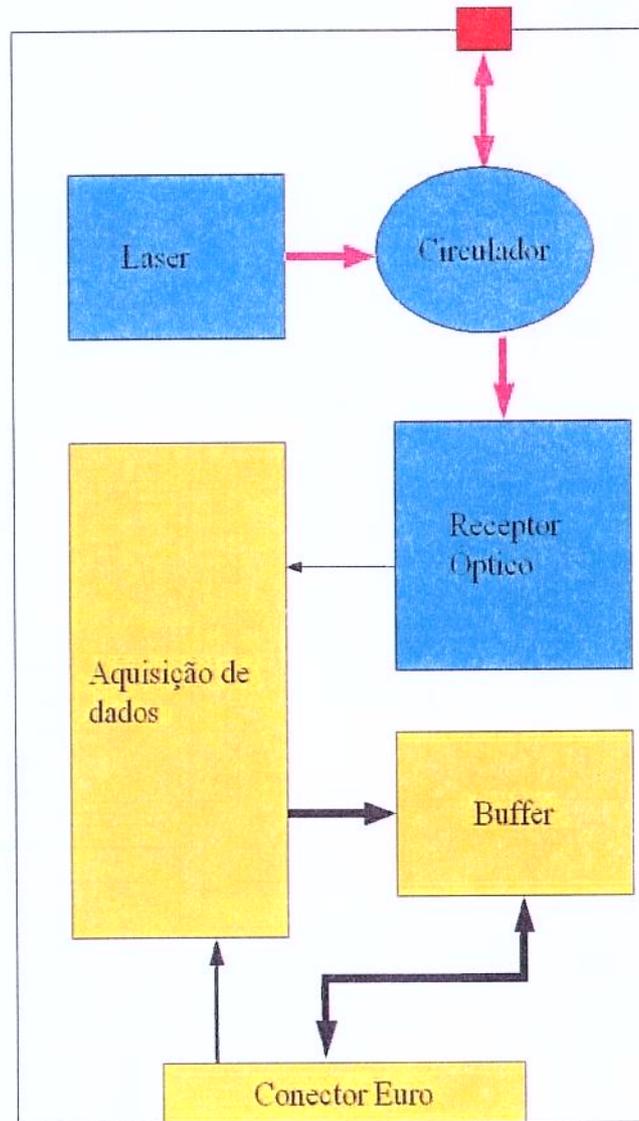


Fig. 3.19: Diagrama esquemático da placa analógica.

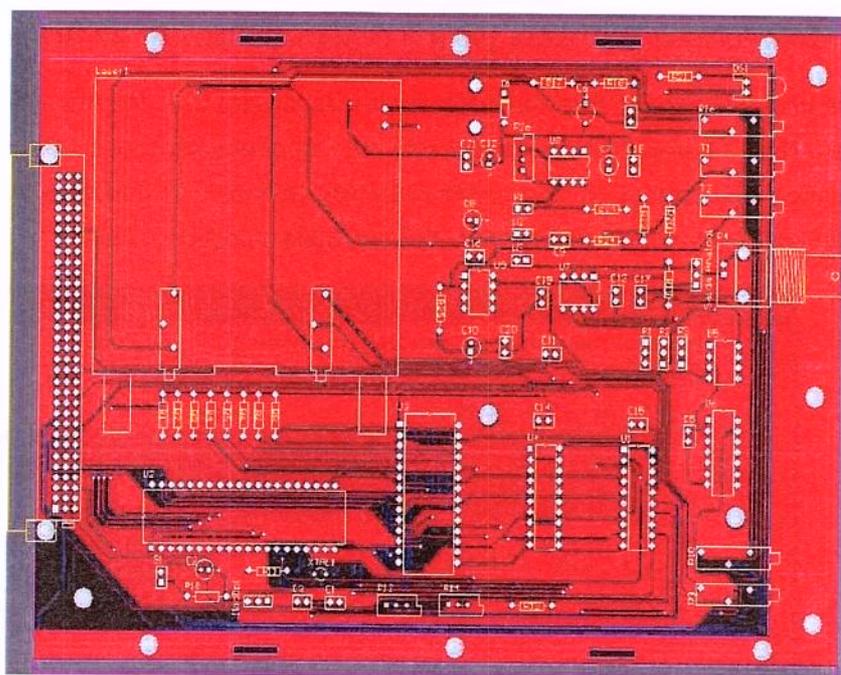


Fig. 3.20: Layout da placa analógica.

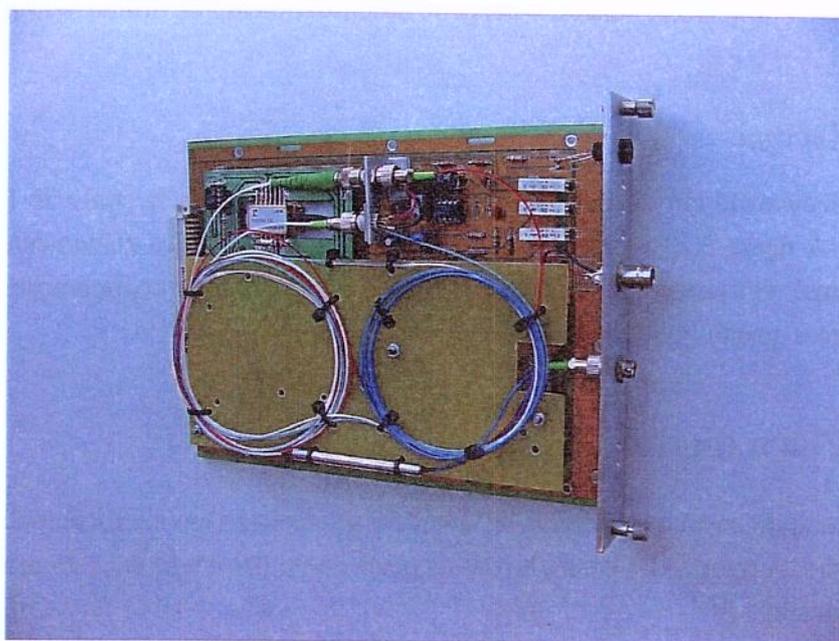


Fig. 3.21: Fotografia da placa analógica.

3.12.1 Metodologia utilizada para o desenvolvimento do firmware

Para o desenvolvimento do firmware utilizou-se a linguagem C. A ferramenta de desenvolvimento utilizada foi o Keil. O programa atualmente está com aproximadamente 6 kBytes. A capacidade de armazenamento de programas do microcontrolador selecionado é de 8 Kbytes. A tela de abertura do software para desenvolvimento do firmware está mostrada na figura 3.22



Fig. 3.22: Tela do sistema de desenvolvimento de firmware Keil.

3.12.2 Average

Foi implementado um filtro digital para realizar a média de cada ponto de 10 curvas de tensão adquiridas. A figura 3.23 ilustra o fluxograma do *Average*, técnica comumente utilizada para filtragem de sinal. O usuário pode selecionar, através de um menu de configuração, se quer utilizar ou não este filtro e quantas médias deverão ser feitas.

3.13 Placa digital

Para fazer o processamento digital de sinais foi selecionado um microcomputador pc104 modelo MZ104 V4 01. A figura 3.24 ilustra layout da placa do PC104 e a figura 3.25 mostra uma fotografia da placa montada.

As funções deste microcomputador são:

- Realizar a medição do valor RMS do sinal
- Realizar a medição do valor de pico do sinal

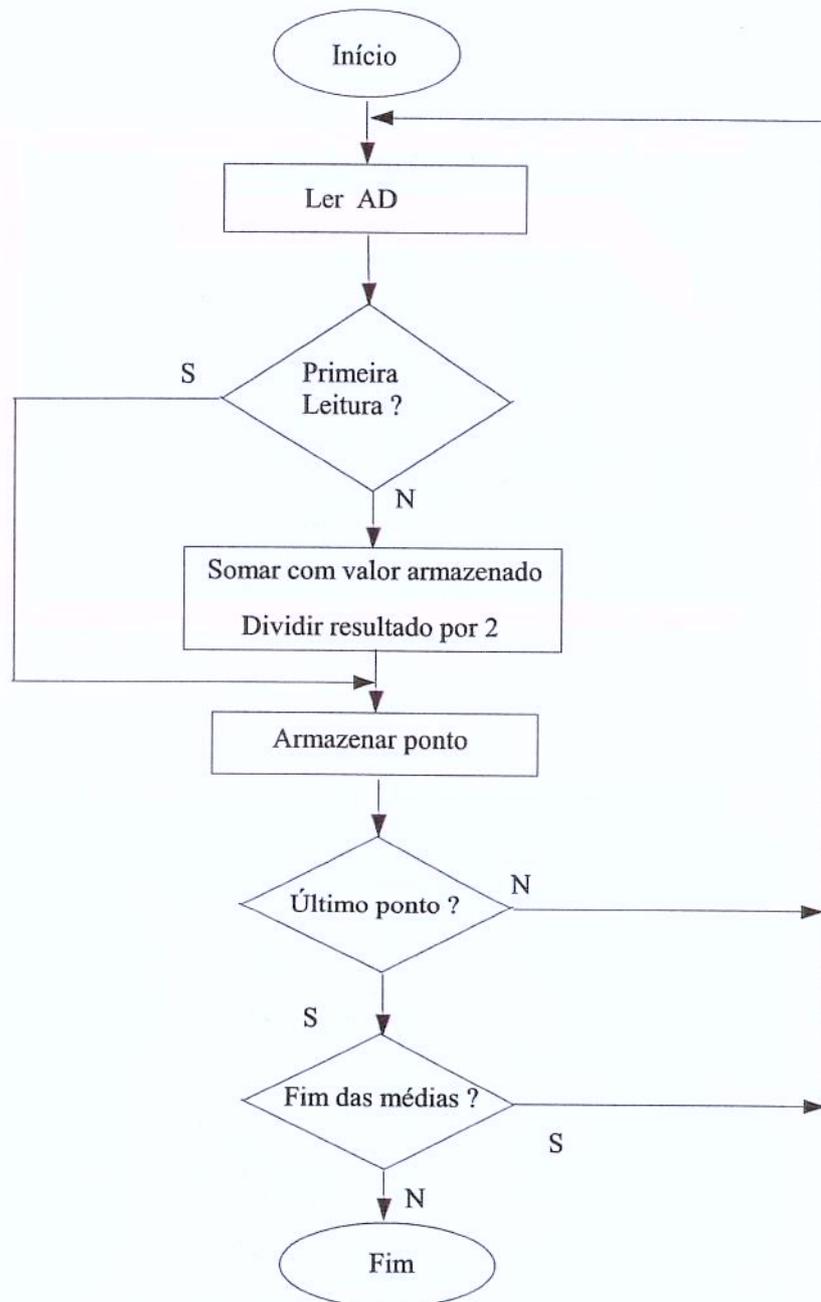


Fig. 3.23: Fluxograma do Average.

- Possibilitar o ajuste de escala para a calibração do medidor
- Comandar a aquisição de dados dos sensores

- Realizar a comunicação com o centralizado através do protocolo DNP 3.0.

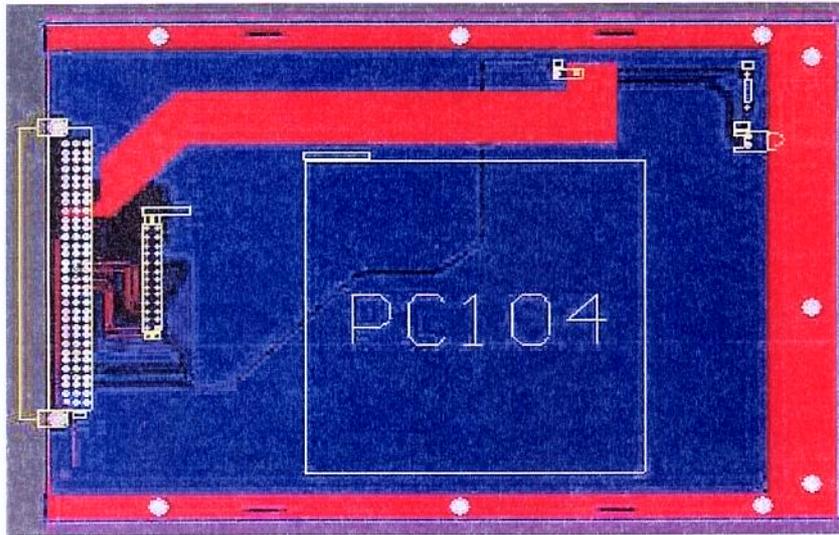


Fig. 3.24: Layout da placa do PC104.

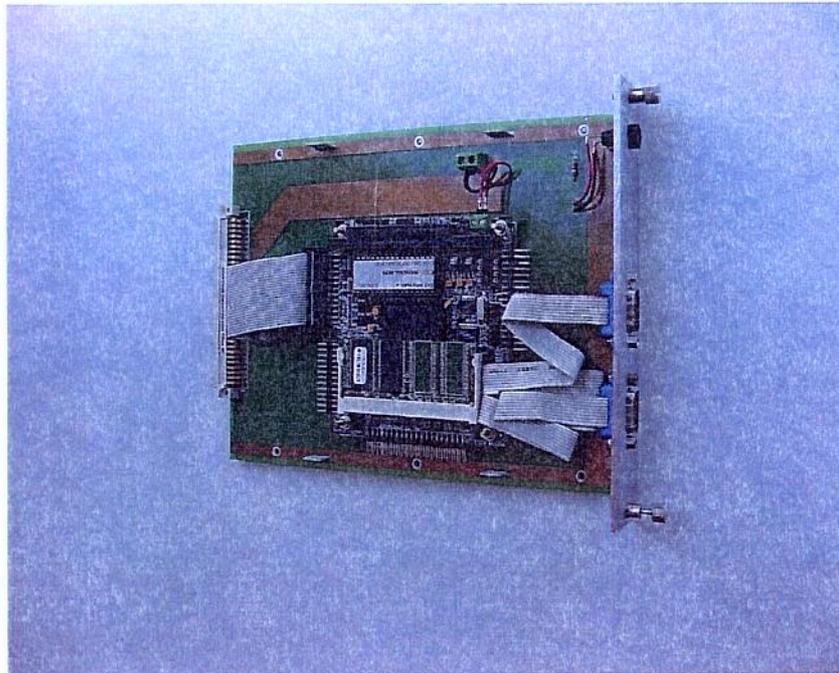


Fig. 3.25: Fotografia da placa do PC104.

3.13.1 Interface do sistema analógico com o sistema digital

O sistema de aquisição de dados é conectado com o sistema digital através de um barramento de 14 vias. A porta paralela do PC104 deve ser configurada no modo EPP. O sinal digitalizado, proveniente do sensor é enviado ao PC104 através da porta paralela. A tabela 3.1 mostra os sinais da placa analógica e os sinais da porta paralela da placa digital com a respectiva pinagem.

Sinal Placa	Conector	Tipo	Sinal PC	Conector	Tipo
D0	12	Saída	D0	2	Entrada
D1	11	Saída	D0	3	Entrada
D2	10	Saída	D0	4	Entrada
D3	9	Saída	D0	25	Entrada
D4	40	Saída	D0	6	Entrada
D5	72	Saída	D0	7	Entrada
D6	5	Saída	D0	8	Entrada
D7	3	Saída	D0	9	Entrada
NMSB	7,28	Saída	Wait	11	Entrada
NTEMDADO	14	Saída	Interrupt	10	Entrada
C0	15	Entrada	Write	1	Saída
C1	16	Entrada	DataStrobe	14	Saída
C2	17	Entrada	Reset	16	Saída
C3	18	Entrada	AddressStrobe	17	Saída
GND	1,2,4,6	Power	GND	18 a 25	GND

Tab. 3.1: Tabela dos sinais de ligação ente a placa analógica e o PC 104 .

A tabela 3.2 mostra como o sinal NTEMDADO controla o barramento de dados .

SINAL NTEMDADO	DADOS
0	Válidos
1	Não Válidos

Tab. 3.2: Condições do sinal NTEMDADO.

Os sinais C0, C1, C2, e C3 selecionam a placa de aquisição de dados com o sensor correspondente de acordo com a tabela 3.3.

C3	C2	C1	C0	Sensor
0	0	0	0	Sensor de tensão fase 1
0	0	0	1	Sensor de tensão fase 2
0	0	1	0	Sensor de tensão fase 3
0	0	1	1	Sensor de corrente fase 1
0	1	0	0	Sensor de corrente fase 2
0	1	0	1	Sensor de corrente fase 3
0	1	1	0	Sensor de temperatura fase 1
0	1	1	1	Sensor de temperatura fase 2
1	0	0	0	Sensor de temperatura fase 3

Tab. 3.3: Sinais de comandos para seleção dos sensores .

3.13.2 Temporização para a interface

A figura 3.26 mostra o diagrama de tempo dos sinais envolvidos na interface da placa analógica com a placa digital.

Diagrama de tempos

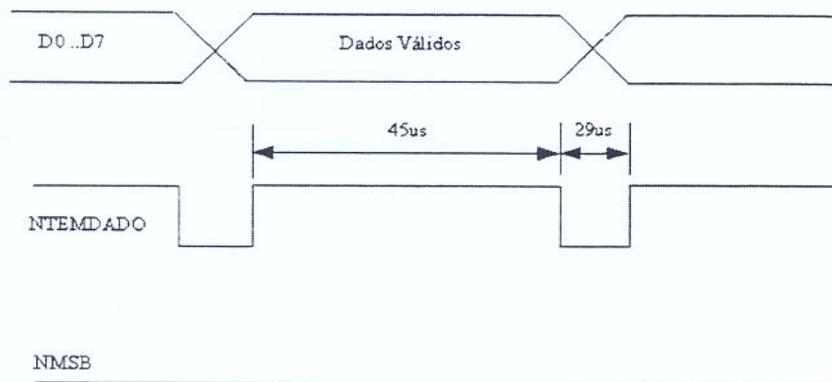


Fig. 3.26: Diagrama de tempos dos sinais de controle do barramento de dados.

3.14 Fonte de Alimentação

A fonte de alimentação do conjunto completo foi projetada e implementada com técnicas convencionais, usando reguladores integrados. A figura 3.27 mostra o diagrama esquemático da fonte, a figura 3.28 mostra o *layout* da placa de circuito impresso e a figura 3.29 mostra uma fotografia da placa da fonte montada.

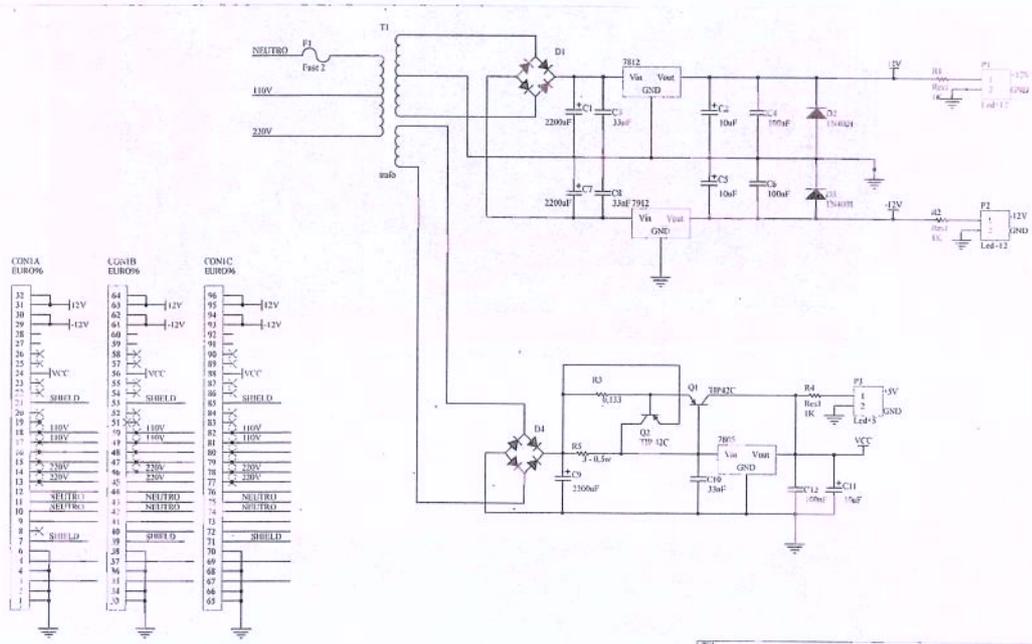


Fig. 3.27: Diagrama esquemático da fonte de alimentação

3.15 Empacotamento

Para empacotar o sistema de sensor utilizou-se uma mecânica de 19 polegadas. Os módulos eletrônicos se comunicam através de um "back plane". A figura 3.30 mostra um diagrama esquemático das placas do sensor de tensão, da placa digital e da placa da fonte de alimentação interligadas.

A figura 3.31 mostra uma fotografia do rack com as placas montadas

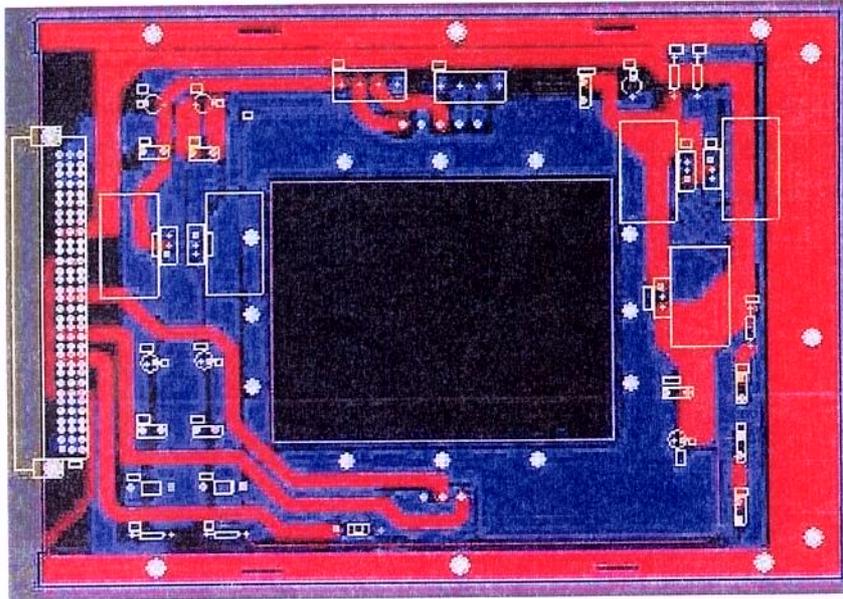


Fig. 3.28: Layout da fonte de alimentação

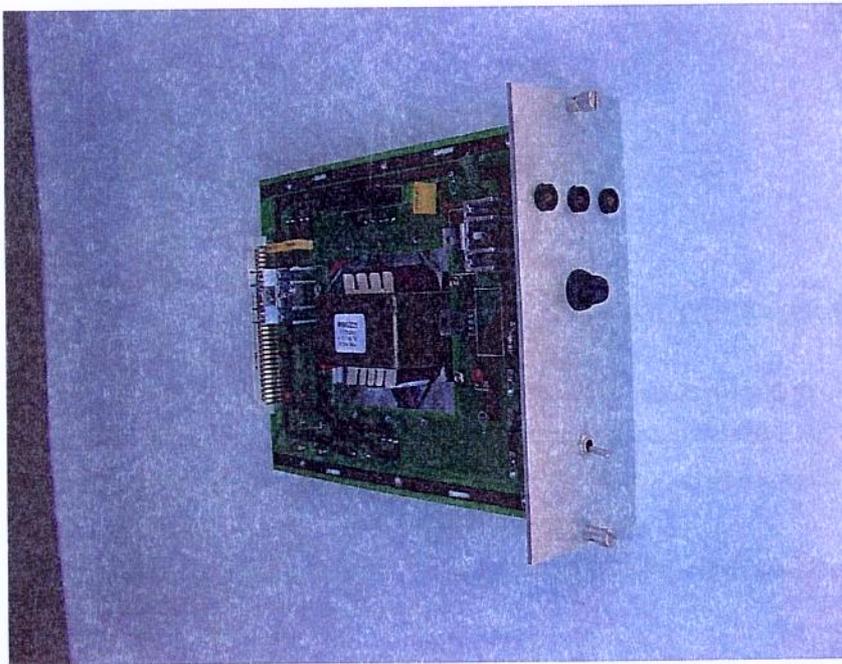


Fig. 3.29: Fotografia da da fonte de alimentação

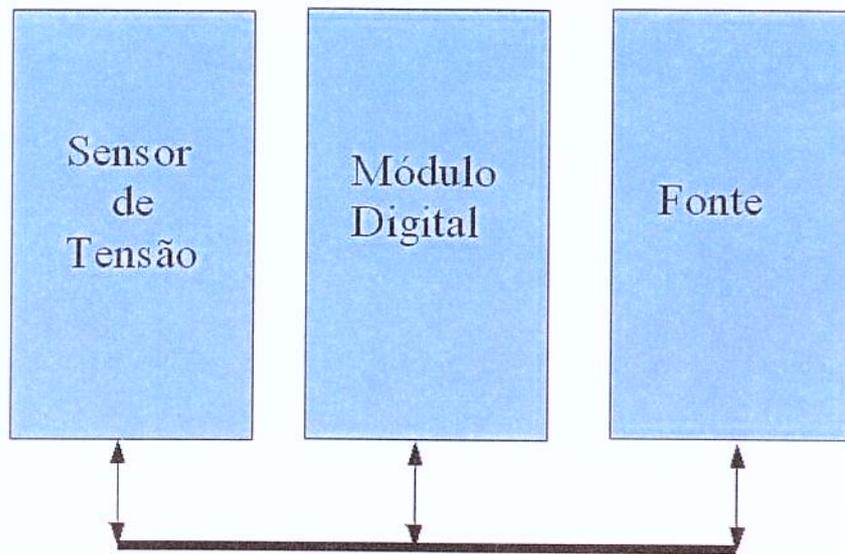


Fig. 3.30: Diagrama de blocos da interconexão das placas sensor de tensão, módulo digital e fonte.

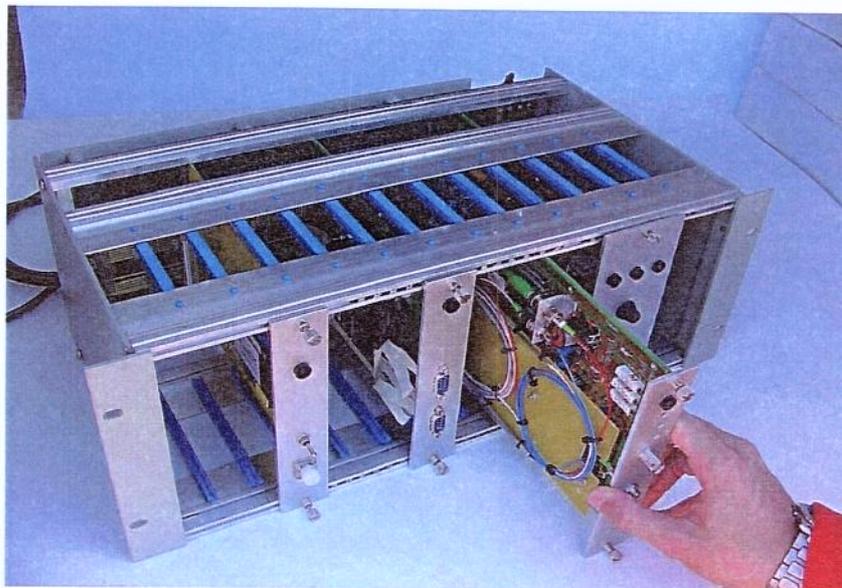


Fig. 3.31: Fotografia do rack .

Capítulo 4

Resultados experimentais

4.1 Testes em laboratório

O protótipo do receptor desenvolvido foi montado e testado em laboratório, no CPqD. Foi utilizado, como fonte de luz, um equipamento laser com uma potência óptica de $5 \mu\text{W}$ e comprimento de onda de 1551 nm. Como fonte de alta tensão, foi utilizado um equipamento Hipot Tester, mostrado na figura 4.1, sendo que o sinal de saída do sensor foi levado ao circuito receptor por um cordão óptico de aproximadamente 20 metros.

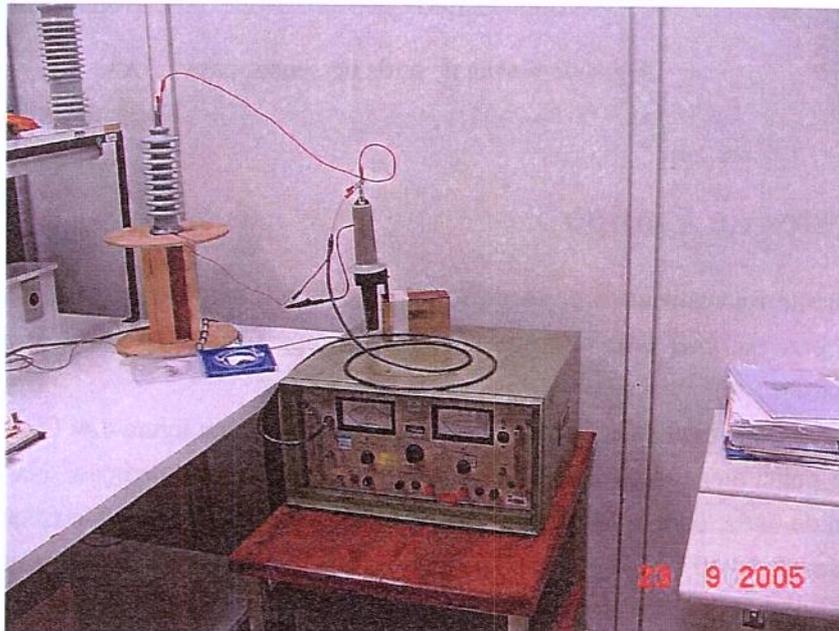


Fig. 4.1: Equipamento para gerar a alta tensão.

A figura 4.2 mostra a forma de onda na saída do circuito receptor, para um sinal de 7,5 KV aplicado no sensor. Na figura 4.3 temos a foto da tela do osciloscópio, quando o sinal na saída do gerador de alta tensão era de 190 V.

Como os resultados dos testes foram muito animadores, iniciou-se uma nova etapa de caracterização, no campo, com o dispositivo sensor montado numa rede elétrica de média tensão.

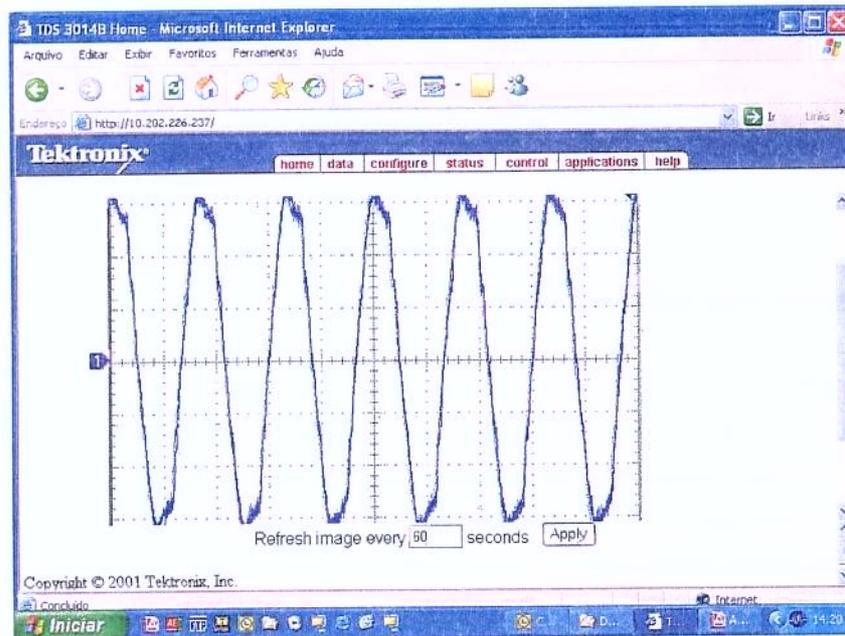


Fig. 4.2: Forma de onda do sensor para 7,5KV.

4.2 Testes no Campo

Inicialmente foi realizada uma medição da tensão na linha elétrica de média tensão com o osciloscópio, para se obter uma referência, para se comparar com a forma de onda proveniente do sensor de tensão.

A forma de onda medida na média tensão está apresentada na figura 4.4. O osciloscópio utilizado possui uma ponta atenuadora de 1000 vezes, que possibilita esta medição. Na figura 4.5 podemos ver a forma de onda, com o valor de pico a pico da tensão em 19,60 KV e frequência de 59,98 Hz. Para um valor de 19,60 KV de pico a pico, assumindo que a forma de onda seja uma senóide perfeita, calculamos o seu valor RMS como sendo de 6,92 KV. Multiplicando-se este valor RMS por $\sqrt{3}$, verificamos que a tensão da rede no local da medida era de aproximadamente 11,97 KV. Da figura 4.4 pode-se observar visualmente que há uma distorção na forma de onda.



Fig. 4.3: Forma de onda do sensor para 190v.

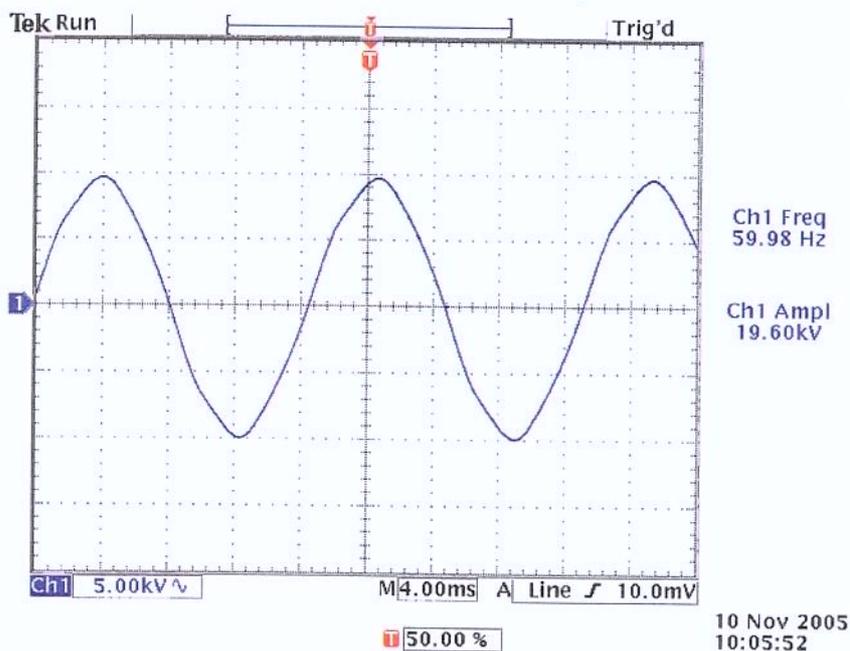


Fig. 4.4: Forma de onda medida com osciloscópio na rede elétrica de média tensão.

4.2.1 Medidas realizadas com o sensor óptico

Os circuitos eletrônicos de controle do sensor e os equipamentos de medição foram acomodados em um *container*, próximo ao poste que contém o sensor, como mostra a figura 4.5, onde é apresen-

tada uma foto da bancada de testes montada dentro do referido *container*. Um cordão óptico faz a interface entre a eletrônica e o sensor.

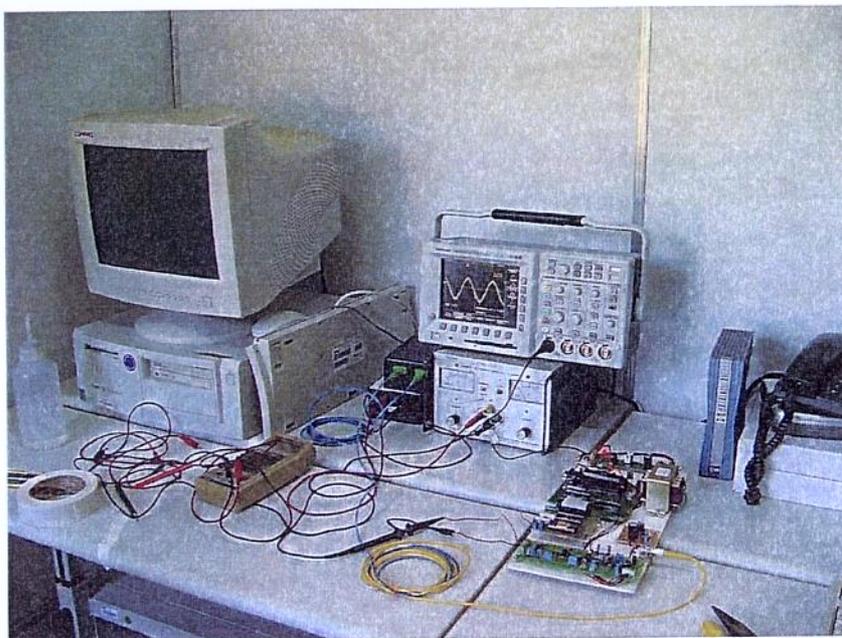


Fig. 4.5: Bancada de teste dentro do *container*.

A primeira verificação que realizamos foi uma comparação da forma de onda do sinal elétrico da rede de média tensão com a forma de onda da saída do circuito receptor. Esta comparação está mostrada na figura 4.6. O sinal elétrico da figura 4.4 estava armazenado na memória do osciloscópio.

A forma de onda cinza é a medida da tensão da rede com o osciloscópio; a forma de onda azul é o sinal medido com o sensor e processado pelos circuitos desenvolvidos. Pode-se observar que as duas formas de onda são bastante semelhantes. A distorção que aparece na onda elétrica aparece também na forma de onda do sensor, porém deslocada de 90° . Este deslocamento está relacionado com o comprimento de onda de trabalho, e pode ser ajustado, selecionando o comprimento de onda do laser que excita o sensor, para se alterar o ponto Q de trabalho do sensor.

Foram feitas diversas medições com o sensor, e observou-se que a amplitude da tensão na saída do circuito analógico de processamento estava variando demasiadamente, tornando impossível de se utilizar de forma confiável. Ou seja, embora o resultado medido em laboratório fosse bom, ao ser submetido às condições de teste em ambiente aberto, com grandes variações de temperatura, o sensor não se mostrou repetitivo, e era necessário se investigar mais profundamente quais os fenômenos que poderiam estar influenciando o seu desempenho, quando operado em campo.

Tem-se vários focos onde a investigação poderia se concentrar, mas pode-se, em primeira análise,

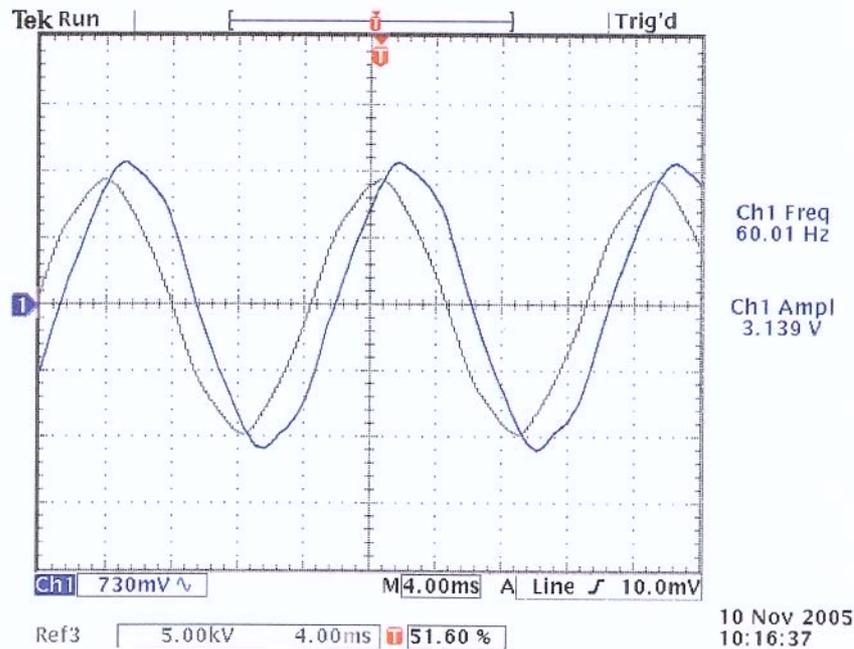


Fig. 4.6: Formas de ondas elétrica e óptica.

identificar três áreas onde poderia estar ocorrendo problemas:

- Sensibilidade dos circuitos eletrônicos de processamento do sinal com as variações da temperatura e de outros parâmetros ambientais, como, por exemplo, a umidade relativa do ambiente;
- Sensibilidade dos circuitos eletrônicos de excitação do laser em função de variações da temperatura e outros parâmetros ambientais, que poderiam alterar a potência do laser e, eventualmente, o seu comprimento de onda;
- Sensibilidade de parâmetros do laser com parâmetros ambientais, como a possível variação do comprimento de onda e da potência do laser em função da temperatura;
- Sensibilidade da Grade de Bragg em função de dilatações da fibra em função da temperatura;
- Sensibilidade do material piezoelétrico ocasionadas por dilatações em função da temperatura, que se refletem como variações na grade de Bragg;

4.2.2 Influência da temperatura ambiente nos circuitos eletrônicos

A primeira providência, de simples realização, para avaliar-se a importância da variação da temperatura ambiente no comportamento dos circuitos eletrônicos, seria controlar a temperatura dos circuitos eletrônicos de processamento, fazendo com que pudesse ser eliminada uma das causas dos problemas verificados em campo.

Para eliminar os problemas de temperatura e umidade em relação aos circuitos de processamento

dos sinais, foi instalado um aparelho de ar condicionado no container, de forma que a temperatura ficasse aproximadamente estável (algo em torno de $\pm 3^\circ\text{C}$), o que diminuiria de forma significativa todos os efeitos de *drift* com temperatura dos componentes eletrônicos dos circuitos de processamento de medida.

Dessa forma, mesmo que essa não fosse uma solução definitiva, poderíamos eliminar uma das hipóteses para o comportamento indesejado na tensão de saída do sinal processado pelo sensor.

Foram feitas medidas no sinal do sensor em dias diferentes, e também anotada a temperatura interna do *container*. Como a potência dissipada pelos circuitos de processamento é muito pequena (da ordem de mW), é razoável assumir que todos os circuitos dentro do container se encontram à mesma temperatura.

Na tabela 4.1 vemos o resultados destas medidas, e observamos que o sinal de saída ainda continua variando a amplitude, eliminando-se, desta forma, a causa "sensibilidade dos circuitos eletrônicos de processamento com a temperatura" como sendo a responsável pelo comportamento indesejado do sinal de medida.

Data	Amplitude	Temperatura	Hora
9/11/2005	10,6 Vpico	21°C	13:31
10/11/2005	3,9 Vpico	22,4°C	12:20
14/11/2005	4,9 Vpico	19,4°C	15:10
16/11/2005	4,84 Vpico	22°C	14:44

Tab. 4.1: Variações observadas na saída analógica no primeiro protótipo do sensor, com os circuitos dentro de um *container* climatizado.

4.2.3 Influência do circuito excitador do laser

A seguir passou-se a estudar a segunda hipótese: a possível sensibilidade dos circuitos eletrônicos de excitação do laser em função de variações da temperatura e outros parâmetros ambientais, que poderiam alterar a potência do laser e, eventualmente, o seu comprimento de onda.

Como o circuito de processamento desenvolvido detecta a amplitude da onda refletida, variações na potência do laser irão aparecer na saída como sendo uma variação na amplitude refletida, ou seja, serão detectadas como "sinal" e serão efetivamente medidas e convertidas em resultado de medida.

Um laser semiconductor apresenta um comportamento praticamente linear na curva Potência de saída (P_O) \times Corrente de excitação (I_F), a partir de um determinado nível de limiar da corrente de excitação (chamado de corrente de *threshold*). Portanto, qualquer variação na corrente de excitação irá produzir um erro proporcional na intensidade da potência refletida a ser medida (P_R). Na figura

4.7 vemos um gráfico de $P_O \times I_F$ de um diodo laser típico, usado como fonte de luz em fibras ópticas, onde podemos observar que a inclinação da reta $\Delta P_O / \Delta I_F$ é da ordem de 0,067 mW/mA.

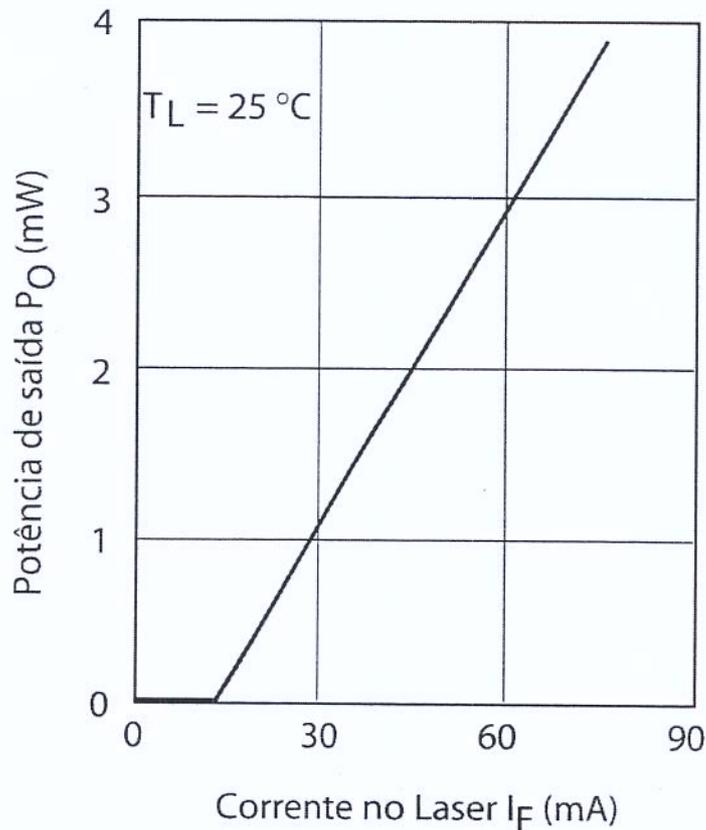


Fig. 4.7: Gráfico de $P_O \times I_F$.

Logo, para um laser operando com uma corrente nominal de 30 mA (o que corresponde a uma potência de saída da ordem de 1 mW), se a corrente de excitação do laser variar apenas 1 mA (3,3%), a potência de saída varia 0,067 mW, o que representa um erro de 6,7% no sinal medido. Uma instabilidade na polarização do laser de $\Delta I_F\%$ resulta em um erro na potência de saída numericamente igual a $\simeq 2 \times \Delta I_F\%$. Isso poderia explicar parte dos erros verificados no sinal medido em campo, pois a corrente de polarização do laser poderia variar com a temperatura e pequenas variações nesta corrente (da ordem de $\pm 10\%$) apareceriam como erros de até 20% no sinal medido.

4.2.4 Influência da temperatura no comprimento de onda do laser

Outra fonte de erro ligada ao diodo laser é que o seu comprimento de onda apresenta forte dependência com a temperatura. Na figura 4.8 temos um gráfico da variação do comprimento de

onda em função da temperatura da junção, para um diodo laser típico de aplicações em comunicações ópticas por fibra. Como se pode observar, a variação do comprimento de onda é da ordem de $\Delta\lambda/\Delta T = 0,1 \text{ nm}/^\circ\text{C}$. Essas variações são extremamente grandes, e podem levar o circuito a operar completamente fora da faixa de comprimento de onda desejado.

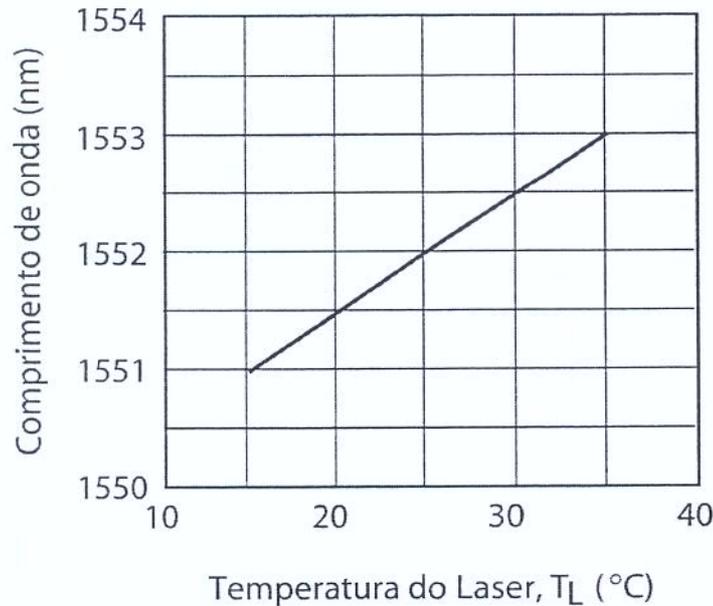


Fig. 4.8: Gráfico da variação do comprimento de onda em função da temperatura da junção do laser, $\lambda \times T_L$.

Para se ter idéia da importância desta variação, basta lembrar que este mesmo diodo é especificado como tendo um comprimento de onda de $1551,72 \pm 0,1 \text{ nm}$. As grades de Bragg podem apresentar uma curva de transferência $P_R \times \lambda$ que varia muito abruptamente para pequenas variações em λ , como apresentado na figura 4.9, onde temos uma variação total de cerca de $\simeq -40 \text{ dBm/nm}$. Logo, uma variação de apenas $0,1 \text{ nm}$ (que é causada por uma variação de apenas 1°C , pode significar uma variação muito importante na potência refletida, principalmente se o sistema estiver operando em uma região onde a declividade da função de transferência $P_R \times \lambda$ é muito acentuada.

Na mesma figura 4.9 vemos que uma variação de aproximadamente -9 dBm no valor de P_R , para uma variação de λ de $0,1 \text{ nm}$. Logo, chega-se à conclusão de que variações de apenas 1°C na temperatura da junção do laser seriam inaceitáveis para este sensor. Para este problema, portanto, o controle de temperatura do ar condicionado não é suficiente, já que as temperaturas no interior do *container* variavam de até $\pm 3^\circ\text{C}$, o que leva a erros de até $\pm 0,3 \text{ nm}$ no comprimento de onda do laser, o que já vimos ser completamente inaceitável.

Para eliminarmos os erros desta devido à variação na temperatura, o laser foi trocado por um laser

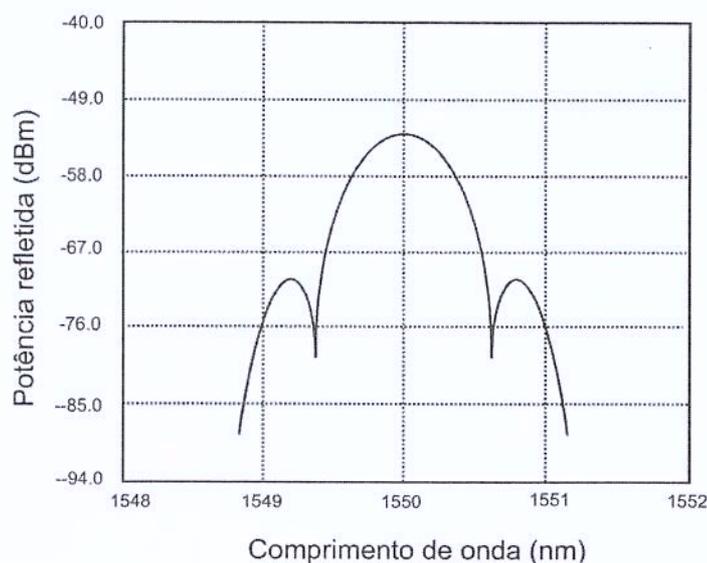


Fig. 4.9: Função de transferência típica de uma grade de Bragg sintonizada em 1550 nm.

com controle de temperatura, o FLD5F6CX-E32, um DFB da Eudyna. Este laser permite o controle interno da temperatura de sua junção usando um dispositivo *peltier* interno. Através de um pino de controle em seu encapsulamento podemos aquecer ou esfriar o CI, e em outro pino temos uma tensão que é proporcional à temperatura da sua junção. Com isso pode-se realizar um circuito que controle a temperatura do CI precisamente.

O fabricante do CI do laser indica que a variação do comprimento de onda λ com a temperatura do encapsulamento é de ± 1 pm/ $^{\circ}$ C, na faixa de operação de -20 a 65 $^{\circ}$ C. Dessa forma, para o laser de comprimento de onda de 1551 nm, a máxima variação que seria observada para o CI operando dentro do *container* seria de aproximadamente ± 4 pm/ $^{\circ}$ C, o que resulta em um desvio $\Delta\lambda = \pm 0,004$ nm. Esta variação no comprimento de onda não deve apresentar nenhum problema para os circuitos, e o emprego de um laser com temperatura controlada deveria resolver os problemas até o momento encontrados, se a origem desses problemas for realmente o controle de temperatura do laser.

É interessante notar que o circuito *peltier* do laser é extremamente eficiente, pois se, por especificação, a máxima variação do comprimento de onda que pode ocorrer na faixa de operação de -20 a $+65$ $^{\circ}$ C é de ± 85 pm, isso implica que a maior variação que a temperatura da junção está sujeita, nestas condições, é de aproximadamente $\pm 0,85$ $^{\circ}$ C, já que a variação $\Delta\lambda/\Delta T$ na junção é de 0,1 nm/ $^{\circ}$ C.

Projetou-se um novo circuito, que incorpora o controle de temperatura do laser através do *peltier* e do controle da intensidade de potência de saída, que é feita usando um recurso de medir, usando um fotodiodo existente internamente ao encapsulamento, a intensidade da luz do laser e aplicando-se

uma realimentação necessária para manter este valor de fotocorrente detectado no fotodiodo interno constante. O novo circuito foi montado e incorporado ao sensor, para ver se os problemas de variação de potência e de variações de temperatura do laser eram os causadores do comportamento completamente inadequado do sinal de saída medido.

O dispositivo laser utilizado é o FLD5F6CX-E32, da EUDYNA, com um comprimento de onda de 1551,72 nm. A figura 4.10 mostra o diagrama esquemático do circuito de driver do laser.

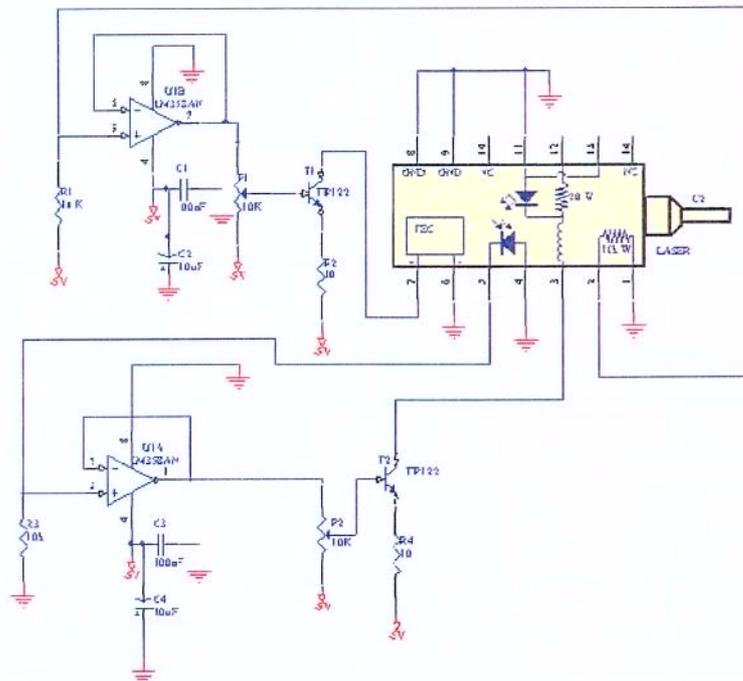


Fig. 4.10: Circuito eletrônico do driver do laser.

Os resultados medidos no sensor que utilizava este novo laser, entretanto, também não foram satisfatórios, e apresentaram os mesmos problemas do protótipo anterior. Os resultados das medidas realizadas com este novo laser são apresentados na tabela 4.5, onde se observa que o comportamento é bastante errático, e de difícil explicação e/ou modelamento.

Como a variação da temperatura interna do container controlada (evitando erros nos circuitos de processamento de sinal analógicos) e a estabilidade da potência de saída e do comprimento de onda do laser não resolveram os problemas de instabilidade do sensor, levantou-se a possibilidade de que o comportamento do sensor sofria alterações significativas com a temperatura ambiente, pois a grade de Bragg sofre deformações com a temperatura.

Diante disto, visando um melhor conhecimento do comportamento da grade de Bragg com a tem-

Data	Hora	Valor pico a pico	Valor máximo
21/06/2006	10:50	748 mV	332 mV
21/06/2006	14:10	612 mV	308 mV
21/06/2006	16:40	2120 mV	1050 mV
22/06/2006	9:00	51 mV	26 mV
22/06/2006	13:40	134 mV	95 mV
26/06/2006	9:25	2100 mV	960 mV
26/06/2006	12:30	340 mV	132 mV
26/06/2006	15:40	1000 mV	524 mV
27/06/2006	9:00	144 mV	74 mV
27/06/2006	15:30	308 mV	142 mV
27/06/2006	15:40	1200 mV	612 mV
28/06/2006	12:30	3360 mV	1270 mV
28/06/2006	14:32	2740 mV	1260 mV
30/06/2006	15:00	4300 mV	2150 mV

Tab. 4.2: Medições realizadas com laser de potência e temperatura controlada.

peratura, realizou-se um teste do sensor em um ambiente com temperatura controlada, para podermos caracterizar o comportamento da grade em função da temperatura.

4.2.5 Medições da variação da função de transferência da grade de Bragg com a temperatura

O sensor sob teste foi excitado com um fonte de luz *LED*, que possui um espectro em frequência bastante largo, quando comparado com um diodo laser, e colocado em uma câmara climática. Foram realizados três ensaios: um na temperatura de 0 °C, outro na temperatura de 25 °C e outro na temperatura de 50 °C. A figura 4.11 mostra uma fotografia da montagem preparada para o ensaio. O resultado das medidas do ensaio está apresentado na figura 4.12.

Na figura 4.12 estão apresentadas três curvas de resposta da grade de Bragg em função da temperatura, obtidas através da medida da saída óptica em um analisador de espectro óptico (OSA). A curva mais à esquerda (vermelha) mostra a resposta do sensor quando submetido à temperatura de 0 °C. A curva do centro (azul) mostra a resposta para a temperatura de 25 °C e a curva da direita (verde) mostra a resposta para a temperatura de 50 °C.

Do resultado apresentado na figura 4.12 pode-se observar que a grade medida apresentou uma variação de aproximadamente 0,7 nm no comprimento de onda da grade para uma variação de 25 °C na temperatura, o que corresponde a uma variação de 0,028 nm/°C.

Além disso, foi possível, com esta caracterização, obter um dado de muita importância, que é a



Fig. 4.11: Setup do ensaio de temperatura na grade de Bragg.

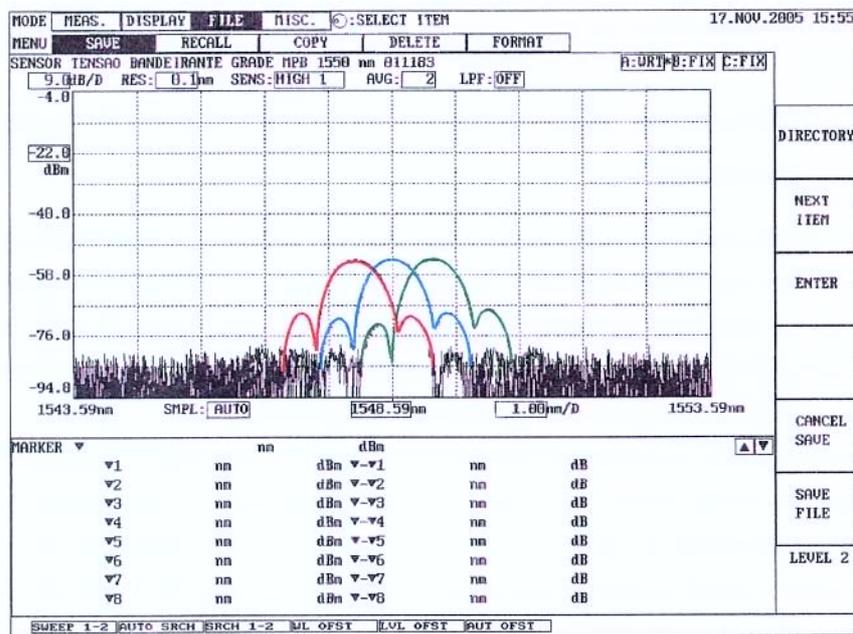


Fig. 4.12: Reprodução da tela do analisador de espectro óptico - OSA.

função de transferência $P_R = f(\lambda)$. A curva de transferência apresenta três regiões bem distintas:

- uma região quase plana, perto do ponto onde a potência refletida é máxima, que tem $\Delta P_R / \Delta \lambda \simeq 0$

dBm/nm, e portanto apresenta ganho muito pequeno, o que não a torna interessante para ser utilizada no sensor;

- uma região de queda bastante abrupta no valor de P_R para pequenas variações de λ , com cerca de - 40 dBm/nm, que é a região onde se deve operar o sensor. Esta região, que tem inclinação positiva à esquerda do comprimento de onda central e negativa à direita, é a ideal para se operar o sensor, pois possui alto ganho e facilita a obtenção do sinal de medida, com a modulação da grade de Bragg em torno de um ponto de operação nessa região.

- uma terceira região, onde temos um novo pequeno pico de sintonia da grade, que não deve ser utilizada, por apresentar comportamento que não permite uma unicidade na definição do sinal de saída em relação ao comprimento de onda do laser que atinge a grade de Bragg.

- É ainda importante observar que o processo empregado na fabricação das grades resulta em uma grade que apresenta uma assimetria em relação ao eixo central, como vemos nas medidas. A região com declividade positiva (à esquerda da frequência de sintonia) apresenta ganho maior do que a parcela com declividade negativa (à direita), embora a banda de frequências em que o comportamento é monotônico (antes de atingir o início do segundo pico de sintonia) é igual nas duas regiões.

Com esta caracterização da grade, vamos apresentar, no próximo capítulo, um estudo para entender o comportamento verificado (e de difícil explicação até o momento) do sensor, bem como propor soluções que possam tornar a utilização confiável deste sensor de alta tensão de baixo custo.

Capítulo 5

Análise e modelamento do sensor com grade de Bragg construído

5.1 Modelamento da Grade de Bragg construída

Para entender as medidas obtidas com o protótipo, o primeiro passo é analisar como o sinal se comporta para as variações medidas na grade de Bragg. Como os resultados de *drift* para os testes realizados variações positivas e negativas de 25 °C em torno da temperatura ambiente foram iguais, vamos assumir que este *drift* é constante. Com isso, dos resultados apresentados na figura 4.12, podemos calcular que a variação da frequência central da grade de Bragg com a temperatura é de aproximadamente 0,028 nm/°C, na faixa de interesse.

Com este valor de *drift* calculado, foram traçadas 3 curvas de transferência para a grade de Bragg construída, nas temperaturas de 20, 25 e 30 °C, apresentadas na figura 5.1.

Nesta mesma figura indicamos o ponto de operação do sensor à temperatura ambiente (25 °C) com um círculo preto, onde admite-se que o comprimento de onda do laser está numa posição adequada (λ_0), bem no meio de uma região de polarização desejada para o sensor. Na mesma figura representamos os pontos de operação do sensor para as temperaturas de 20 e 30 °C (com os círculos amarelo e laranja, respectivamente).

Como se pode observar, os pontos de operação apresentam amplitudes de potência refletida muito diferentes, o que resulta em medidas diferentes na tensão de saída do sensor. As inclinações das curvas de transferência em torno de cada ponto de operação são muito diferentes, o que também gera amplitudes completamente diferentes no sinal de saída medido.

Além disso, o que é muito pior, para atingir o ponto de operação indicado pelo círculo amarelo, a função de transferência passa por um ponto de mudança de concavidade. Isso faz com que, para uma tensão constante no sensor e a temperatura variando de 25 para 20 °C, o sinal medido no fotodetector

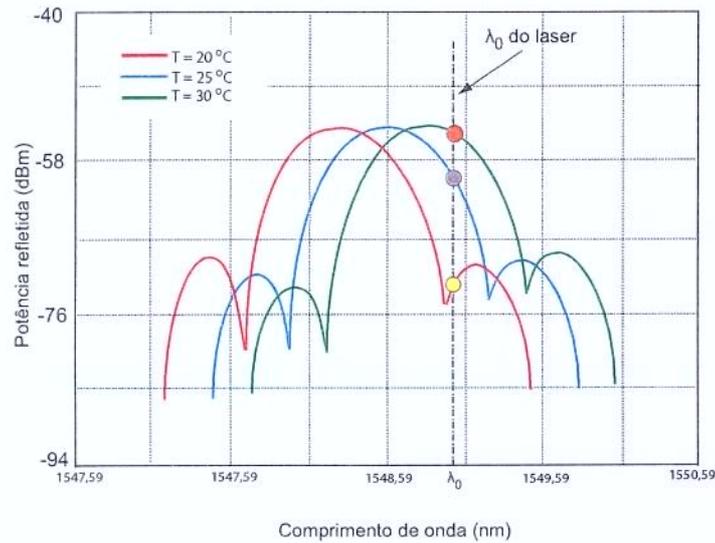


Fig. 5.1: Curvas de transferência da grade de Bragg a 20, 25 e 30 °C.

apresente um comportamento como o indicado na figura 5.2. Esta curva da Fig. 5.2 (o ganho da grade de Bragg) é obtida através de uma varredura linear dos valores das curvas de transferência em função da temperatura, para o ponto de operação λ_0 , calculando-se a derivada em cada ponto da varredura. Devemos lembrar que, como em um amplificador convencional, o ganho negativo indica que houve uma inversão na fase do sinal de saída.

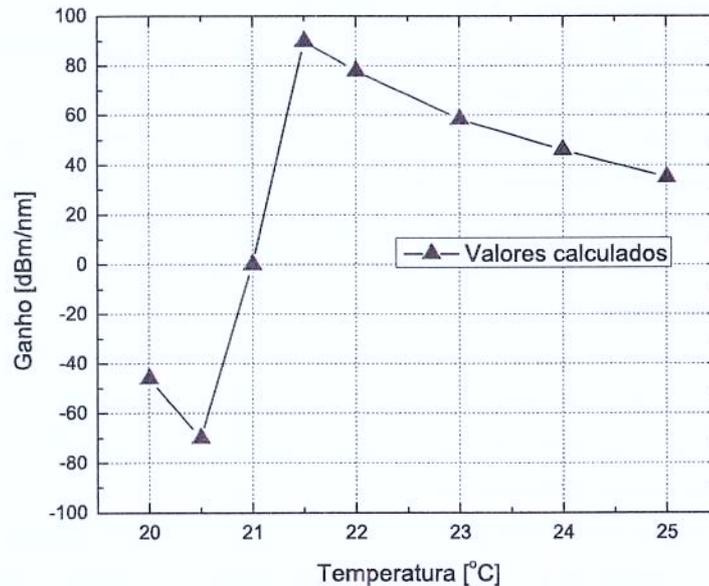


Fig. 5.2: Gráfico do ganho em função da temperatura.

Isso explica o comportamento medido no sensor em campo, pois para um sinal constante de tensão, podemos ter a potência refletida (que é a variável medida pelos circuitos eletrônicos) aumentando ou diminuindo, a taxas diferentes e até mesmo com um ponto de mudança de concavidade, onde o sinal medido na reflexão passa por um ponto de derivada igual a zero. É interessante notar que se o circuito estabilizar neste ponto de inflexão e o sinal aplicado for muito pequeno, a tensão de saída medida pode ser quase que zero! Essa análise explica comportamento do sinal medido, onde tínhamos, para o sinal de tensão constante de 11,9 KV, tensões na saída que podiam ser praticamente zero (51 mV) ou 4,3V.

5.2 Proposta de uma solução para a operação da grade de Bragg de forma estável

Com esta análise e o sensor modelado para o comportamento em temperatura, vamos fazer uma proposta de um novo sistema de controle de detecção de potência refletida em uma grade de Bragg, onde os efeitos com a temperatura possam ser eliminados.

A idéia básica, utilizada em outros trabalhos (53), é utilizar uma segunda grade de Bragg, que atua apenas como sensor de temperatura, para corrigir os efeitos da dilatação térmica na grade que está efetivamente medindo o campo elétrico, e medindo a diferença do comprimento de onda entre as duas grades. Esses sistemas, entretanto, são muito caros, já que necessitam de um OSA para determinar os comprimentos de onda na saída do sensor.

Como a proposta deste trabalho é apresentar um sensor de baixo custo, essa possibilidade fica totalmente eliminada, sendo necessário desenvolver um outro tipo de compensação, onde possa se continuar a medir a amplitude do sinal de saída, que é possível de ser feita com circuitos de baixo custo, como apresentamos anteriormente.

Além disso, o projeto deste sensor – que emprega a técnica de medir a amplitude do sinal refletido – apresenta um outro problema, que é o ajuste do ponto quiescente de operação da grade.

É importante lembrar que, mesmo admitindo-se que a temperatura não varie, se a grade estiver sintonizada ligeiramente fora do comprimento de onda ideal do laser, podemos ter:

- o sensor operando com ganho muito baixo, o que resultaria em uma medida muito difícil de ser realizada (ponto de operação em região de baixa declividade)
- o sensor operando perto de um dos pontos de inflexão da curva de transferência da grade de Bragg, o que resultaria em medidas completamente erradas, pois a função de transferência poderia apresentar uma enorme não linearidade, além de uma mudança no sinal do seu ganho.

Na figura 5.3 vemos uma ilustração de como o ponto de operação influencia o ganho medido na potência refletida, onde mostramos as várias declividades (numericamente iguais aos ganhos nos

pontos de operação) da curva de transferência da grade de Bragg empregada no sensor.

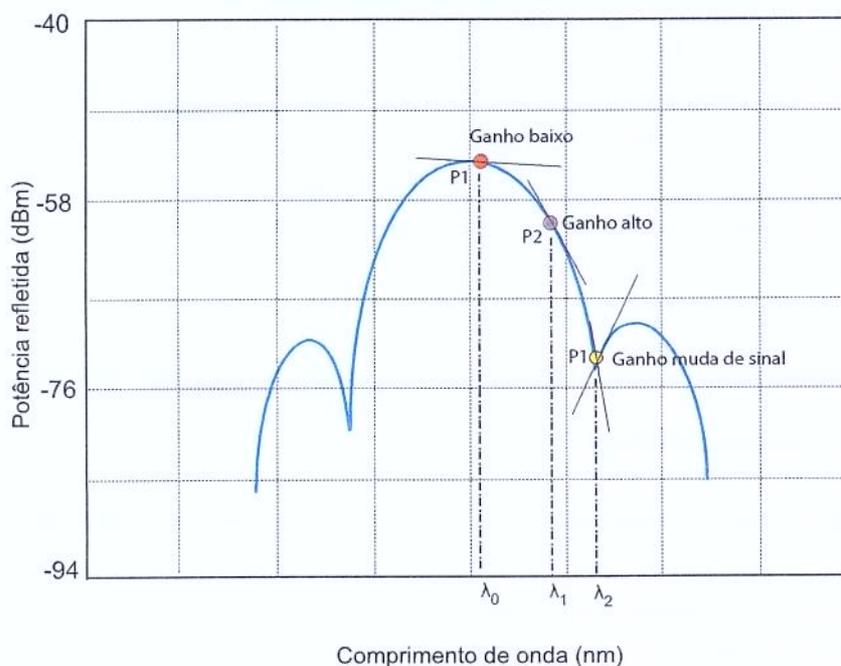


Fig. 5.3: Ganho variando em função dos pontos de operação.

Portanto, na realidade, deve-se resolver dois grandes problemas para a confecção deste tipo de sensor: a localização inicial do ponto de operação do laser, e a estabilidade da função de transferência da grade de Bragg com a temperatura.

A figura 5.4 mostra, de forma simplificada, o diagrama de blocos do sistema de controle óptico que estamos propondo.

O princípio de funcionamento do dispositivo está baseado na utilização de dupla grade de Bragg para compensar os efeitos da temperatura no resultado de medição da tensão elétrica, uma vez que o dispositivo sensor, figura 5.15 ficará instalado ao relento e sofrerá as variações da temperatura. Utilizou-se de uma fonte de luz com um dispositivo emissor de luz superluminescente, um Sled, pois este possui um espectro óptico largo, isto é, emite luz em diversos comprimentos de onda λ . A luz emitida passa por um dispositivo circulador óptico, com 3 portas, sendo que a luz do sled entra pela porta 1, sai pela porta 2 e chega até o dispositivo sensor por meio de uma fibra óptica, atingindo o sensor de temperatura.

A luz, de largo espectro, bate na grade de Bragg do sensor de temperatura e uma parte desta luz, com um comprimento de onda λ da grade proporcional à temperatura do dispositivo sensor, retorna pela fibra óptica até o circulador, entrando pela porta 2 e saindo pela porta 3. Esta luz, com espectro óptico bem mais estreito que a luz do Sled, é conectada na porta 1 de outro circulador e sai na porta 2,

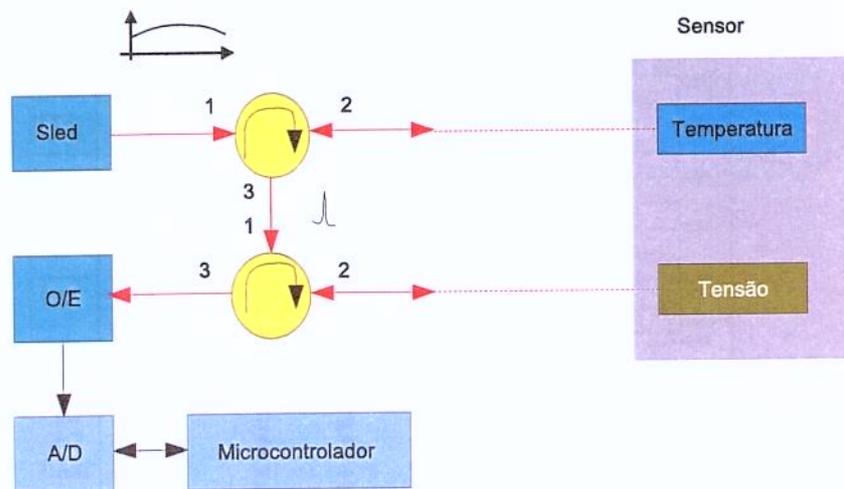


Fig. 5.4: Diagrama de blocos do circuito tradicional com dupla grade de Bragg.

indo até ao dispositivo sensor por outra fibra óptica, atingindo o sensor de tensão elétrica. Parte desta luz, retorna pela mesma fibra óptica até a porta 2 do dispositivo circulador óptico e sai pela porta 3, indo para o circuito eletrônico conversor óptico-elétrico, que converte a intensidade da luz recebida em tensão elétrica.

Este nível de tensão é convertido para digital, por um conversor analógico-digital e lido por um microcontrolador, que processa o sinal, realizando filtragens digitais e disponibilizando a informação para que um microcomputador possa ler e realizar os cálculos do valor de pico, valor RMS da tensão e, posteriormente, possa ser transmitida por intermédio de um meio de comunicação convencional ao sistema de monitoramento centralizado.

É interessante observar que o sensor de temperatura serve como fonte de luz sintonizada para o sensor de tensão, o que garante que a fonte de luz que excita o sensor de tensão e a grade de Bragg do sensor de tensão estejam sempre em sintonia. Com isso elimina-se a influência da temperatura na medida da tensão elétrica, uma vez que os dois sensores estão no mesmo ambiente térmico e sofrerão as mesmas alterações térmicas.

A figura 5.5 mostra uma tela do OSA com as duas grades selecionadas para o teste de viabilidade desta técnica.

A figura 5.6 mostra o resultado do teste elétrico realizado no laboratório com dupla grade e a figura 5.7 mostra o resultado de um teste térmico do sensor com dupla grade.

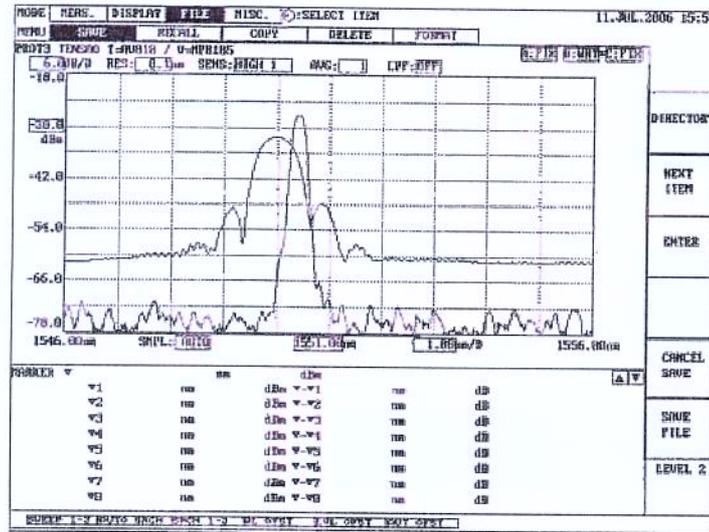


Fig. 5.5: Tela do analisador de espectro óptico com as duas grades de Bragg selecionadas.

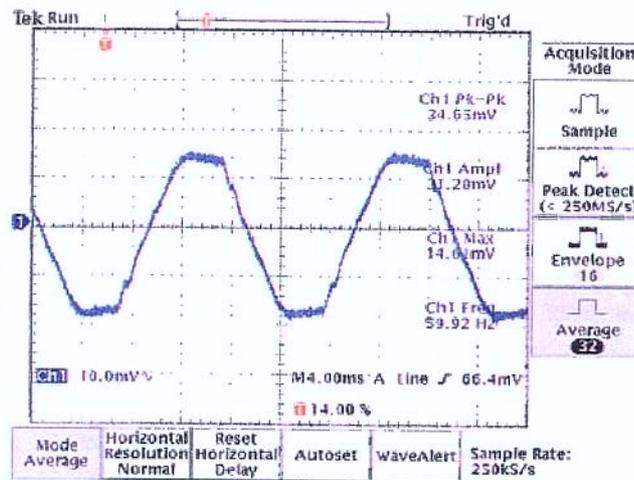


Fig. 5.6: Resultado do teste elétrico com a dupla grade.

Observando a tela do OSA podemos ver que:

- Em nenhum instante a grade ficou cega, ou seja, retornou luz em qualquer temperatura;
- O comprimento de onda de retorno aumentou com o aumento da temperatura;
- A potência óptica refletida é constante independentemente do comprimento de onda.
- Selecionando-se um fotodiodo que responda linearmente na faixa de variação do λ , a tensão de saída do receptor óptico não será alterada em função da variação da temperatura.

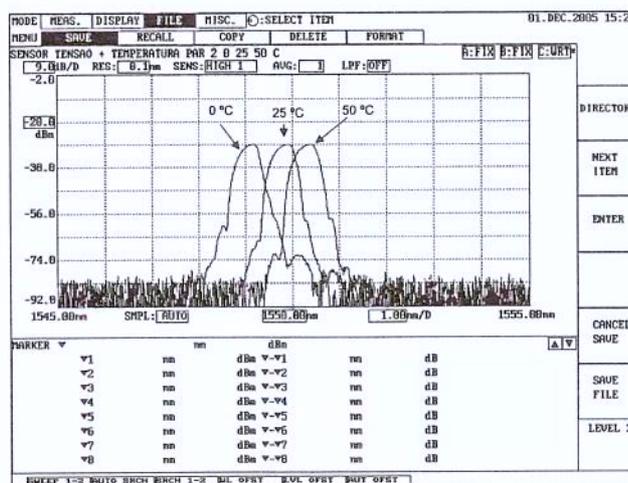


Fig. 5.7: Resultado do teste térmico com a dupla grade.

Para que a técnica de dupla grade convencional possa ser utilizada neste caso, uma série de problemas de fabricação nas grades teriam de ser contornados, já que elas deveriam ter sintonias altamente precisas, melhor do que 0,1 nm de precisão.

Outro problema é que a grade que opera como fonte de luz para a segunda deve possuir uma característica muito abrupta, com um fator de sintonia extremamente alto, para que o sinal detectado na segunda grade fosse facilmente tratável por um circuito eletrônico, baseado em fotodetector e amplificador de transimpedância. Dessa forma, embora comprovada a viabilidade técnica desta técnica, descartamos a possibilidade do desenvolvimento ser baseado em um sistema de dupla grade tradicional.

A idéia proposta para solucionar este problema é bastante não convencional, pois utiliza a temperatura do laser como variável para proporcionar a estabilidade do sistema, tanto em relação ao ponto de operação ideal, bem como em relação às variações de temperatura que o sensor está submetido.

Esta escolha é baseada em dois fatores:

- 1) Embora seja possível escolher um laser com uma determinada frequência de operação, a dispersão encontrada na especificação do fabricante, que é de $\pm 0,1$ nm, somada às variações sempre presentes no processo de fabricação da grade de Bragg podem fazer com que fique muito difícil fabricar um sensor com o comprimento de onda certo, ou seja, com o ponto de operação certo, de forma a ter ganho conhecido. Como é possível variar o comprimento de onda do laser variando a temperatura de sua junção, deve ser possível projetar um circuito que faça essa correção na temperatura da junção do laser para atingirmos o ponto ótimo de polarização;
- 2) As variações medidas na função de transferência da grade de Bragg precisam ser compensadas em temperatura, e se conseguirmos mudar o comprimento de onda do laser de forma que $\lambda(T)$ seja

uma função que tenha comportamento semelhante ao da dilatação da grade de Bragg em função da temperatura, é possível fazer com que a grade de Bragg do sensor fique sempre polarizada no mesmo ponto de operação. Com a técnica que vamos propor, o ajuste do circuito de determinação do ponto quiescente ótimo seria bastante sofisticado e difícil de ser implementado automaticamente, em uma produção. A calibração manual seria a mais indicada, pois, como vamos apresentar, ela é simples e fácil de ser realizada. A figura 5.8 mostra o diagrama de blocos do circuito de controle eletrônico para corrigir o efeito da temperatura no sensor de tensão.

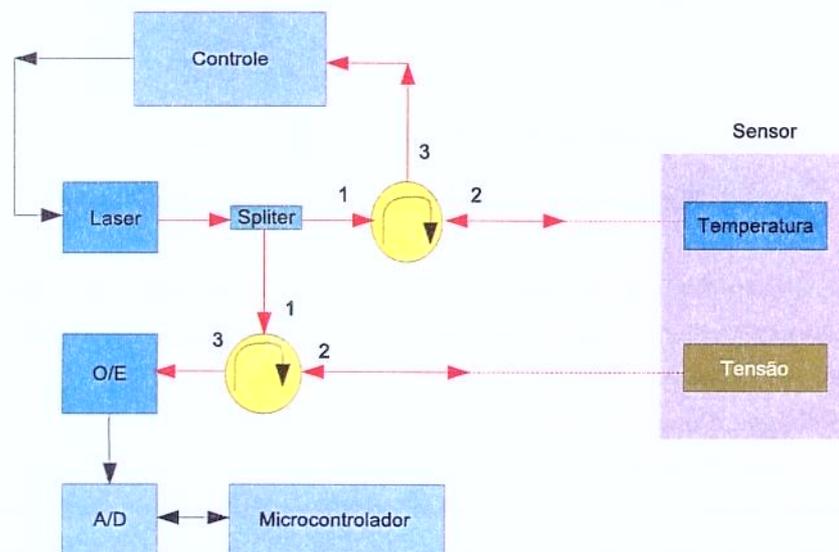


Fig. 5.8: Diagrama de blocos do circuito proposto para correção com temperatura do ponto de polarização ótimo.

5.2.1 Proposta de circuito para ajuste do ponto de operação ótimo para o sensor

A idéia para a realização deste circuito é que, conhecendo-se a função de transferência da grade que opera como sensora, devemos escolher o ponto ótimo de operação, onde temos um ganho pré-determinado. Em princípio não é necessário qualquer preocupação com a amplitude da excursão do sinal medido pela grade sensora de campo elétrico, já que as variações esperadas no valor da medida da tensão da rede – na aplicação desejada, que é o monitoramento de redes de 13,8 KV – deve ser bem pequena, e pode-se considerar que o sinal vai excursionar muito pouco em torno do ponto de operação. Além disso, é possível calibrar, variando a distância dos eletrodos, a sensibilidade do material piezoelétrico com relação ao campo elétrico a ser medido, o que sempre permite que o sensor seja utilizado com pequenos sinais em torno do seu ponto de operação.

Para um ajuste manual do ponto de operação, é necessário caracterizar a grade de Bragg previamente (com um OSA) e, a partir do conhecimento da função de transferência medida, escolher um ponto no meio da região de ganho linear.

Por exemplo, para a grade utilizada no sensor desenvolvido, cuja função de transferência da parte com declividade positiva é apresentada na figura 5.9, escolhendo o ponto quiescente de operação à temperatura ambiente com o comprimento de onda $\lambda_0 = 1548,2$ nm, teremos um ganho de aproximadamente 22,5 dBm/nm.

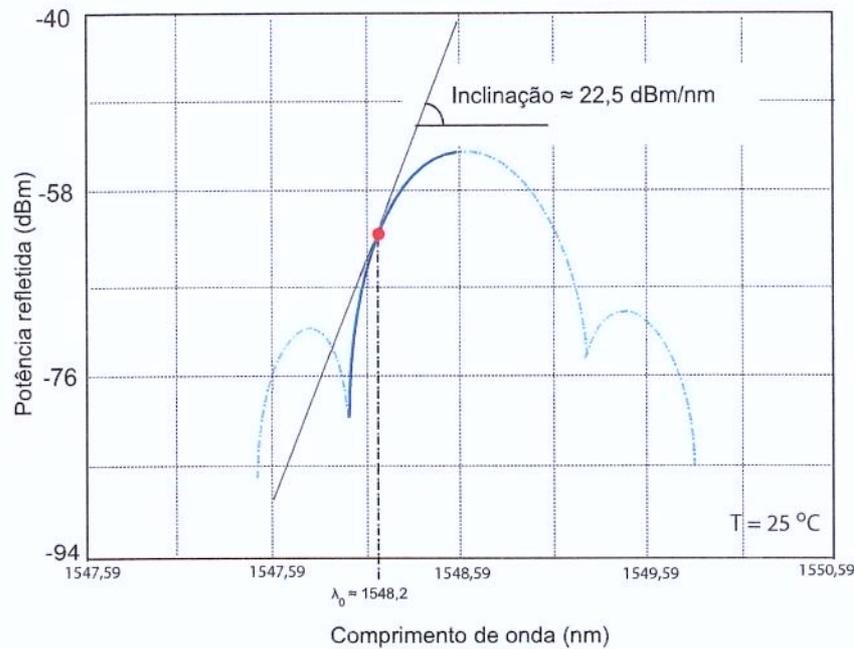


Fig. 5.9: Escolha de um ponto de operação.

O procedimento proposto para o ajuste do conjunto grade/laser neste ponto é:

- 1) Escolher um modelo de laser cujo comprimento de onda seja o mais próximo de 1548,2 nm, quando operado na temperatura de referência de 25 °C. No caso do laser FLD5F6CX, temos que escolher o modelo FLD5F6CX-E36, que opera com um comprimento de onda igual a 1548,51 nm nessa temperatura.
- 2) Em seguida, consultando a tabela do fabricante que fornece $\lambda \times T_L$, vemos que a taxa de variação do comprimento de onda deste laser com a temperatura é de 0,1 nm/°C. Conclui-se que, para abaixar o comprimento de onda de 1548,51 nm para os 1548,2 nm desejados ($\Delta\lambda = 0,31$ nm), a temperatura de operação da junção do laser deve ser diminuída em 3 °C em relação à temperatura de referência, ou seja, deve ser igual a 22 °C, pois uma variação $\Delta T = 3$ resulta em uma variação de $-0,31$ nm no λ .

3) Finalmente, deve-se escolher a potência do laser com a qual se deseja trabalhar. No caso do sensor, utilizou-se uma corrente de excitação do laser de aproximadamente 55 mA, o que fornece para o FLD5F6CX-E36 uma potência óptica de saída $P_O \simeq 2,6$ mW.

Ao fim destes três passos, temos definido o modelo do laser, a sua corrente de excitação e a temperatura em que ele deve operar.

Para ajustar a temperatura da junção do laser através de um circuito de controle, é necessário obter um modelo que expresse a variação de temperatura na junção em função da tensão externa que deve ser aplicada ao elemento *peltier*. Como o valor da temperatura na junção não pode ser lido diretamente, para podermos obter esse modelo, é necessário fazer uma leitura indireta de T , através da medida do comprimento de onda na saída óptica do laser, que apresenta um comportamento muito bem conhecido de $\lambda = f(T)$.

A caracterização deve ser feita com o laser excitado com uma corrente de 55 mA (ou seja, com a potência nominal em que vai ser utilizado), para que o seu comportamento térmico em função da tensão aplicada ao elemento *peltier* já leve em consideração a carga térmica provocada pela dissipação de potência do laser.

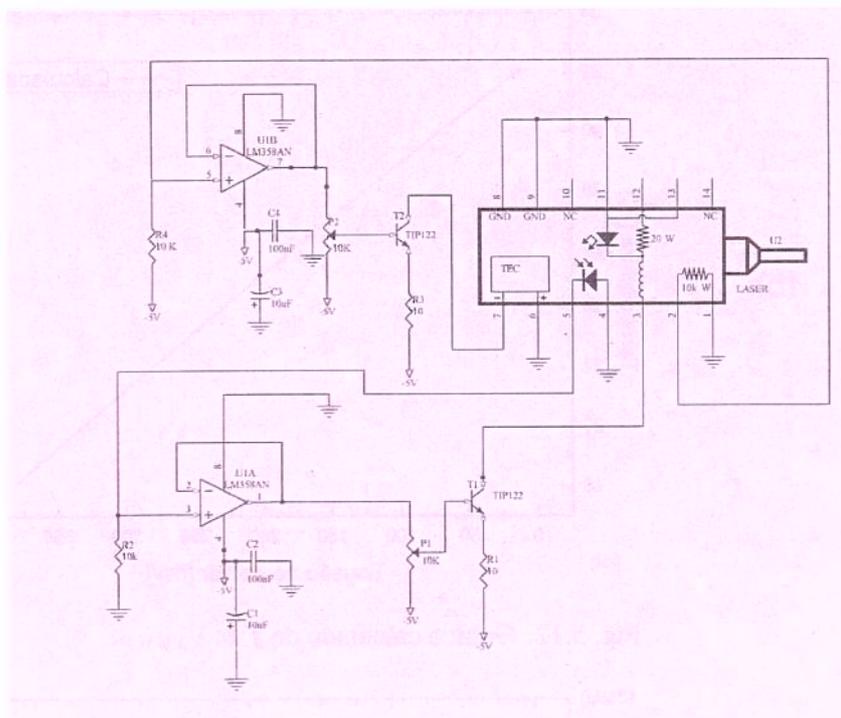
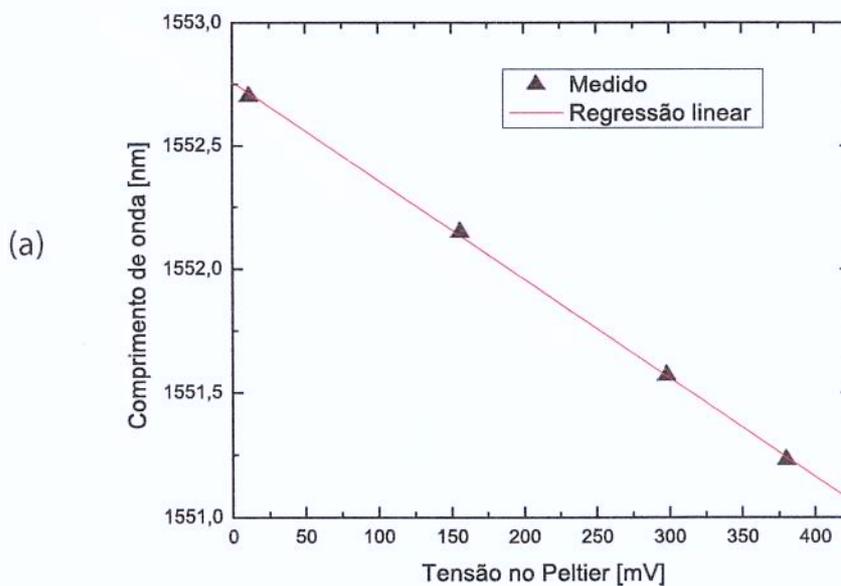
Para isso é necessário montar um *setup* de testes como o apresentado na figura 5.10. Note-se que a temperatura do CI é controlada em malha fechada (o mesmo circuito usado para estabilizar o laser em aplicações convencionais), pois é necessário esperar o laser estabilizar termicamente para medir o comprimento de onda da luz na saída óptica. Ajustando a tensão V_{TEMP} , que é uma referência externa, fazemos com que o circuito de controle atue de forma a estabilizar a temperatura do CI em diversos valores.

Medindo-se o comprimento de onda na saída e usando a equação que fornece $T = f(\lambda)$ calculada a partir das especificações do fabricante, pode-se traçar um gráfico da temperatura T em função da tensão externa de referência V_{TEMP} . Na figura 5.11 vemos o gráfico dos resultados das medidas de caracterização de λ em função de V_{TEMP} para o FLD5F6CX-E32. A partir desses valores, apresentam-se nas figuras 5.12 e 5.13 os gráficos das curvas calculadas de T em função de V_{TEMP} , e de λ em função de T , respectivamente.

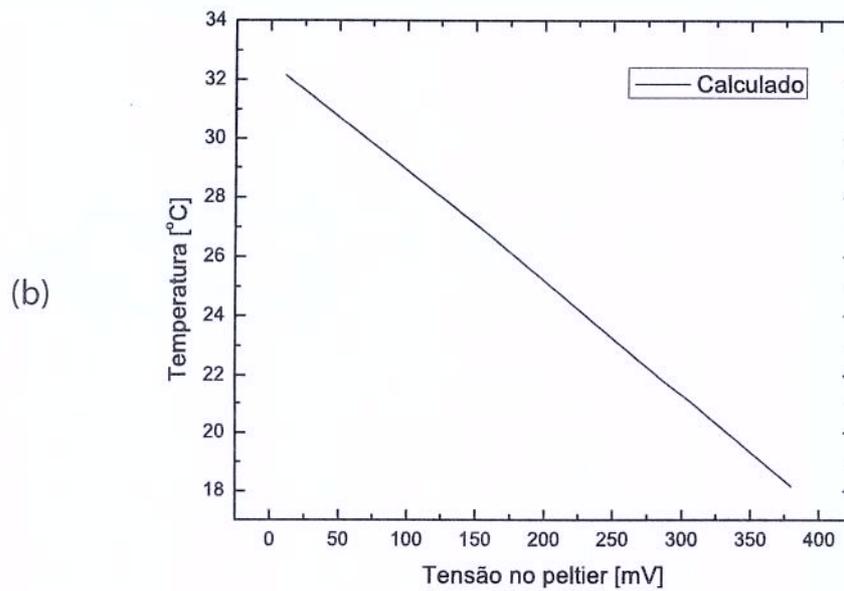
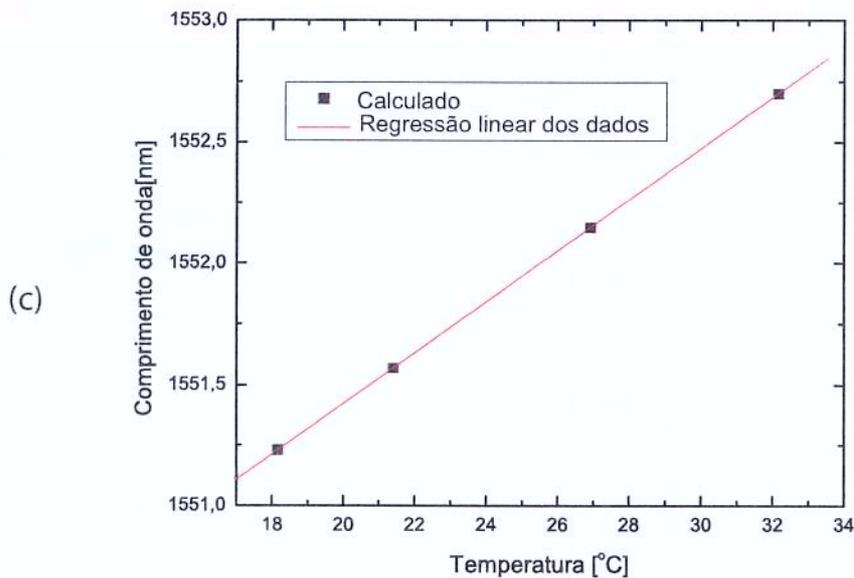
Como o modelo do laser caracterizado é o FLD5F6CX-E32, cujo comprimento de onda está próximo de $1551,72 \pm 0,1$ nm na temperatura de 25°C , isso mostra que os resultados medidos e calculados estão em pleno acordo com os valores fornecidos pelo fabricante.

Destes gráficos vemos que, por exemplo, se é desejado um λ de 1552,0 nm para operar no ponto correto de uma determinada grade de Bragg, é necessário aplicar uma tensão de referência $V_{TEMP} = 189$ mV no *peltier*, o que fará com que o laser opere na temperatura de $25,6^\circ\text{C}$ e forneça efetivamente os 1552,0 nm em sua saída óptica.

Usando-se o procedimento indicado, pode-se calibrar o CI do laser para que ele, na temperatura

Fig. 5.10: Setup de medida de T em função de V_{TEMP} .Fig. 5.11: Resultado da medida de $\lambda \times V_{TEMP}$.

controlada do ambiente de calibração, opere no comprimento de onda ótimo para o circuito detector com amplificador de transimpedância.

Fig. 5.12: Gráfico calculado de $T \times V_{TEMP}$.Fig. 5.13: Gráfico calculado de $\lambda \times T$.

5.2.2 Proposta de circuito para manutenção do ponto de operação ótimo para o sensor com a grade de Bragg variando com a temperatura

Como já mencionado anteriormente, a função de transferência da grade de Bragg precisa ser compensada em temperatura, e uma forma de se conseguir essa compensação é mudar o comprimento

de onda do laser, de forma que o seu $\lambda(T)$ siga a mesma função de dilatação observada na grade de Bragg com a temperatura.

Das medidas apresentadas na figura 5.11 é possível determinar como a sintonia da grade de Bragg utilizada varia em função da temperatura. Na figura 5.14 temos uma representação gráfica desta função, e como se pode observar, a variação de λ_{sint} em função de T é praticamente linear.

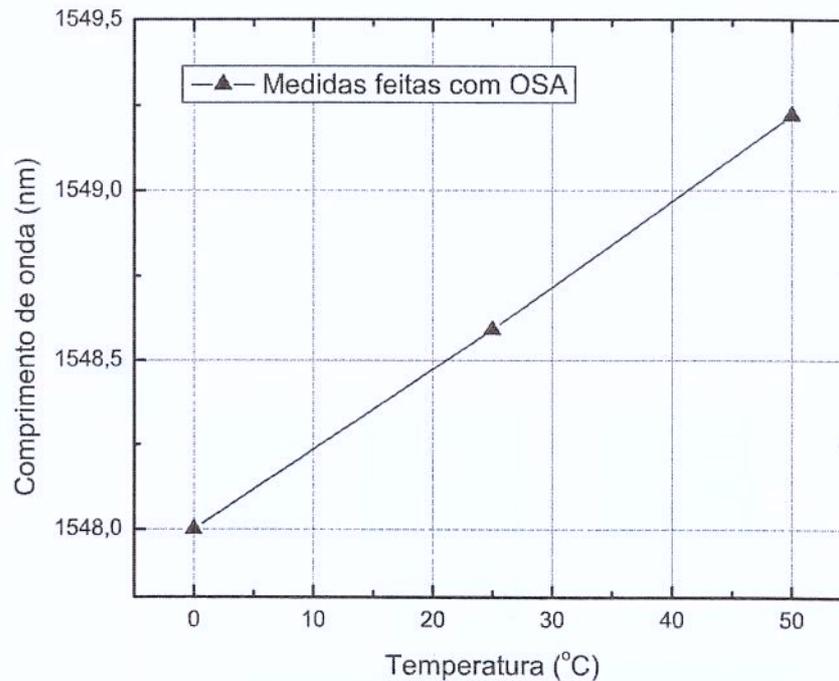


Fig. 5.14: Resultado da medida em laboratório de $\lambda_{sint} \times T$.

Para permitir a compensação em temperatura da grade de Bragg sensora de tensão/campo elétrico, vamos utilizar uma segunda grade, casada com a primeira, porém que não sofra as influências do campo elétrico. Para isso, os eletrodos em seus terminais devem ser aterrados, como indica a figura 5.15.

O sinal de saída desta segunda grade é, portanto, apenas função de sua temperatura. É importante lembrar que, como as duas grades são montadas muito próximas, a temperatura será sempre igual nas duas.

Esta segunda grade - que vamos chamar de grade sensora de temperatura - é excitada com o mesmo sinal de laser usado para a primeira grade (com $\lambda = 1548,2$ nm), através de um divisor óptico *splitter*. Logo, o ponto quiescente de operação desta segunda grade, se as grades são casadas, é exatamente o mesmo da grade sensora de tensão.

O diagrama de blocos que mostra o princípio de funcionamento desta compensação proposta é

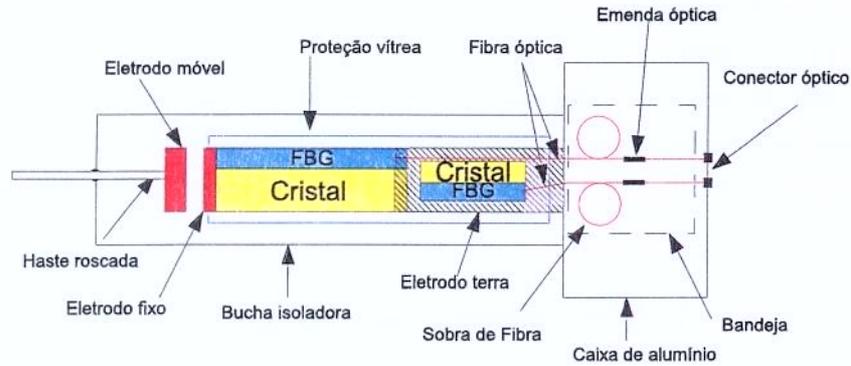


Fig. 5.15: Montagem de um sensor com dupla grade de Bragg.

apresentado na figura 5.16.

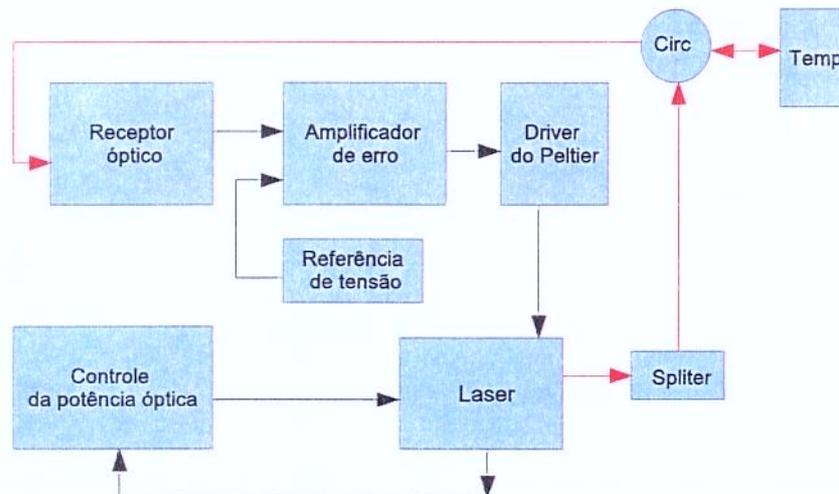


Fig. 5.16: Diagrama de blocos do sistema de estabilização de ponto de operação proposto.

Usando-se um novo fotodetector, composto por um amplificador transimpedância DC e um filtro passa-baixa, obtemos um sinal DC, na saída do filtro, que depende da curva de transferência da grade sensora de temperatura e do comprimento de onda λ_0 .

Para a temperatura de referência em que se deseja operar o laser (que deve ser de $T = 22^\circ\text{C}$ para o FLD5F6CX-E36), deve-se medir esse sinal DC, obtendo uma tensão que chamaremos de V_{REF} . Sabe-se, portanto, que sempre que o sinal na saída do filtro passa baixas for igual a V_{REF} , as duas grades de Bragg estarão operando no ponto quiescente desejado, com $\lambda = 1548,2 \text{ nm}$.

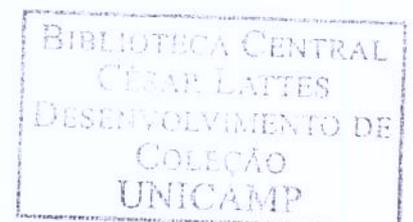
Ao ser submetida à variações de temperatura, que são muito lentas no tempo, pois são devido à variações na temperatura ambiente, esta grade sensora de temperatura irá dilatar/encolher, mudando

a sua função de transferência e alterando o valor da potência refletida.

Isso ocorrendo, o conjunto fotodetector/amplificador/filtro irá apresentar uma variação DC na saída, indicando que a grade não está mais na posição ótima de polarização, já que o sinal presente na saída do filtro passa-baixas não é mais igual a V_{REF} . Este sinal DC, que chamaremos de $V_{controle}$, é aplicado a um amplificador de erro, que faz a diferença entre este valor medido $V_{controle}$ e o valor da tensão de referência V_{REF} , e multiplica essa diferença por um ganho A .

O sinal de tensão deste amplificador de erro é, então, aplicado ao dispositivo *peltier*, e irá atuar nele, aquecendo ou resfriando a temperatura da junção do laser, até que o seu comprimento de onda na saída seja tal que, quando aplicado na grade sensora de temperatura, retorne uma potência que gera uma tensão $V_{controle} = V_{REF}$, e zere o sinal de erro.

Dessa forma, temos um sistema em malha fechada que, através do controle da temperatura da junção do laser, força as duas grades de Bragg usadas operarem sempre no ponto ótimo de polarização, no caso, com $\lambda = 1548,2$ nm.



5.3 Projeto de um circuito analógico de polarização no ponto ótimo e compensação com temperatura

Na figura 5.17 é apresentado o circuito analógico completo do controle que permite o ajuste do ponto de operação quiescente, e mantém este ponto de operação durante todo o intervalo de temperaturas em que as grades podem operar, conforme a proposta apresentada.

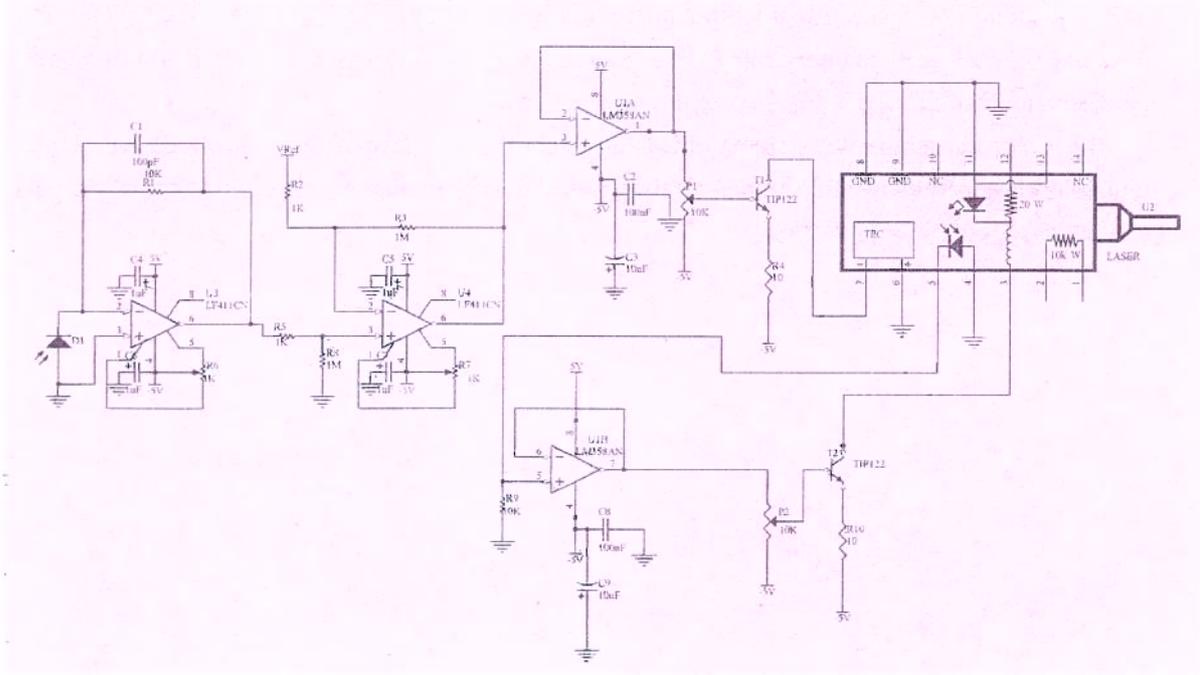


Fig. 5.17: Circuito proposto para estabilização de ponto de operação do sistema laser-grade de Bragg.

Como não dispúnhamos de mais grades de Bragg nem de lasers com o comprimento de onda desejado para executar o teste com o circuito proposto, foi projetado um setup especial, onde um modelo do sistema óptico-térmico-elétrico foi simulado, porém utilizando apenas componentes eletrônicos convencionais para a sua implementação. Este sistema é apresentado na figura 5.18.

Na figura 5.19 apresentamos o resultado simulado do circuito apresentado, onde para emular a variação da temperatura na grade de Bragg e a conseqüente perda de condição de polarização ótima, alterava-se o valor de R1. É interessante notar que mesmo quando submetido a um degrau de temperatura, o sistema se recobra rapidamente da perturbação e volta para o ponto ideal de polarização, ao ajustar a temperatura de RA e corrigir o "comprimento de onda do laser (I_{in}) de forma a manter a corrente I_{out} constante, ou seja, manter a grade polarizada sempre no mesmo ponto de operação.

Na figura 5.20 apresentamos o circuito projetado para representar o sistema de controle descrito,

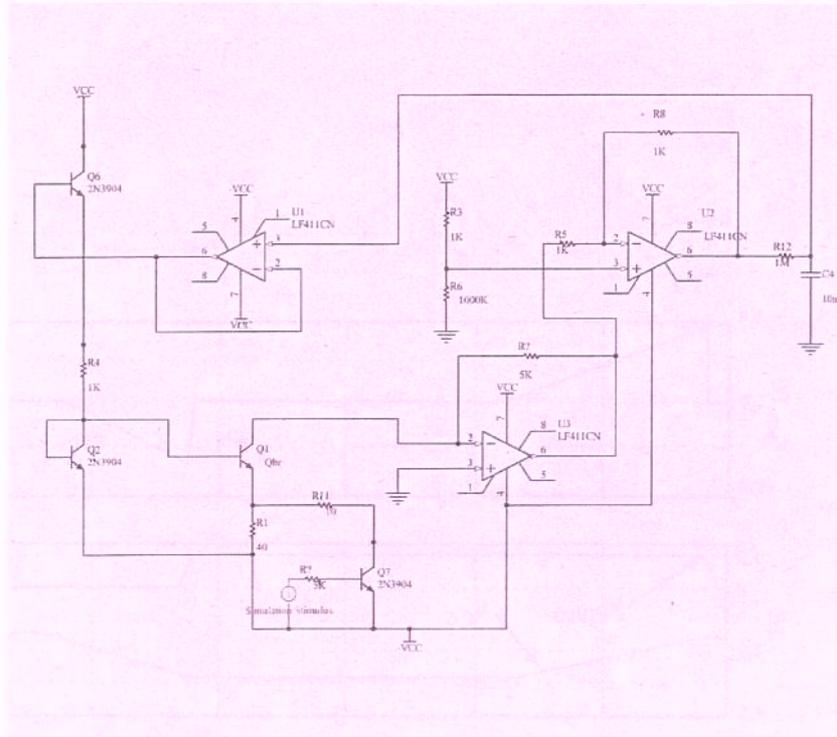


Fig. 5.18: Circuito utilizado para simulação do circuito que modela o sistema óptico-térmico-elétrico do conjunto laser-grade de Bragg.

podendo ser útil como uma ferramenta didática para cursos de engenharia elétrica, na disciplina de sensores e atuadores.

O espelho de corrente Q1-Q2-R1 representa a grade de Bragg, que possui uma relação entrada-saída de corrente dependente de R1. A corrente de entrada do espelho I_{in} representa a luz do laser incidente na grade, e a intensidade desta corrente representa o comprimento de onda do laser. A corrente de saída do espelho I_{out} representa a corrente detectada no fotodiodo. Ela é influenciada tanto pela "temperatura da grade"(R1) como pelo comprimento de onda da luz injetada na grade (I_{in}). Isso simula adequadamente o fenômeno de polarização de uma grade como a da figura 5.6, pois quanto maior a temperatura da grade (maior o valor de R1) menor será a intensidade da potência refletida, e quanto maior o comprimento de onda, maior será a potência refletida.

A corrente de saída do espelho é convertida em tensão pelo amplificador OP-1, que é um amplificador transimpedância, exatamente como no circuito de controle proposto. Esta tensão é comparada com V_{REF} no amplificador de erro. A tensão de erro é usada para aquecer RA (que modela o elemento peltier do laser) e a temperatura de RA, medida pelo LM35, um sensor de temperatura integrado, é usada para controlar o "comprimento de onda"do laser, que é a corrente I_{in} .

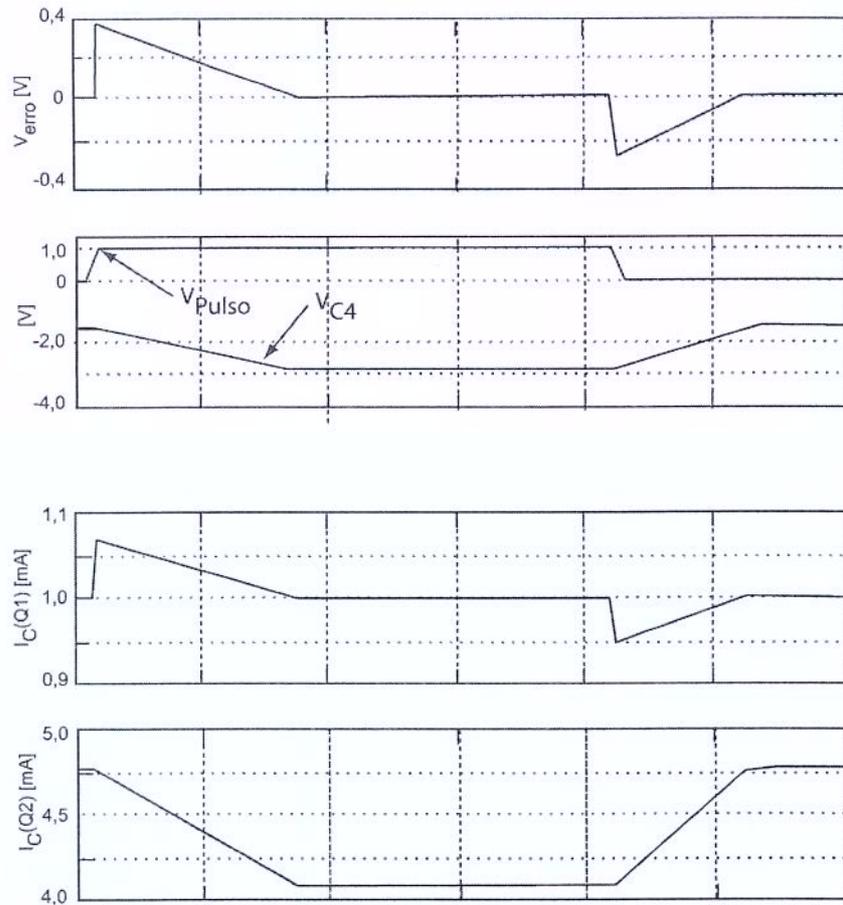


Fig. 5.19: Resultado da aplicação de um pulso de perturbação (variação de R1) ao circuito, mostrando que o sistema se recupera do erro.

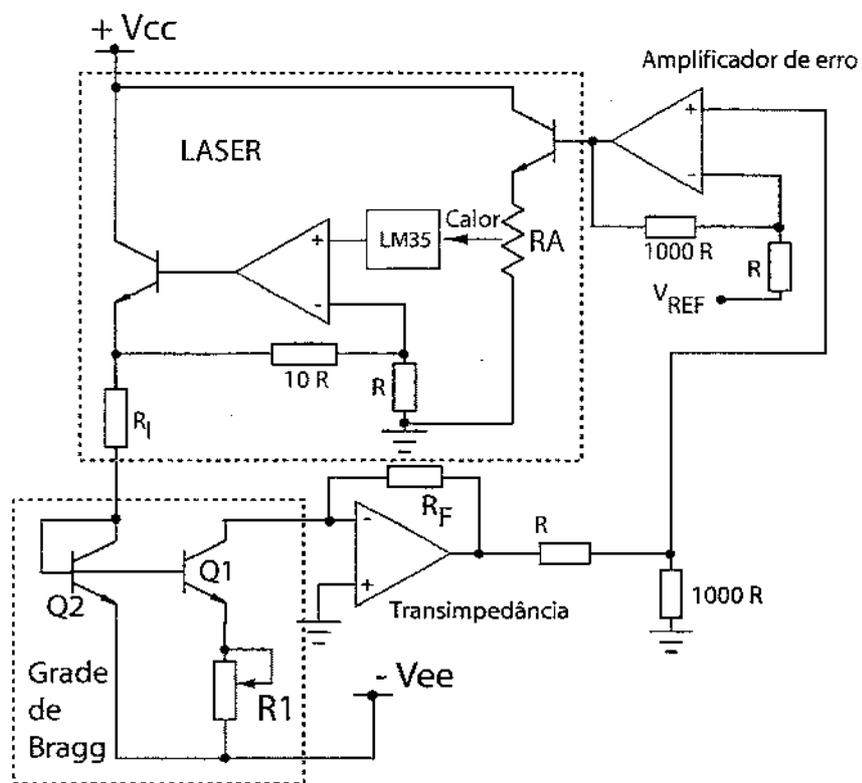


Fig. 5.20: Circuito que modela o sistema óptico-térmico-elétrico do conjunto laser-grade de Bragg.

Capítulo 6

Conclusões

6.1 Conclusões

O levantamento bibliográfico realizado possibilitou uma visão atual das técnicas e do estado da arte em sensoreamento com base em fibras ópticas. Tendo em vista as diferentes e inúmeras técnicas disponíveis para detectar o parâmetro de interesse, nenhuma técnica de detecção emergiu para se estabelecer como líder. A técnica da grade de Bragg em fibra tem se mostrado bastante eficiente para a detecção de campo elétrico, temperatura, força. O efeito Faraday é utilizado para a detecção de corrente elétrica e as células de Pockels são utilizadas para detecção de alta tensão.

Com o objetivo da obtenção de sensores ópticos de baixo custo, para uso na rede de distribuição de energia elétrica, foi estudado e desenvolvido, no decorrer deste projeto, uma nova técnica de sensoreamento com a utilização de transdutores e sensores de fibra com grade de Bragg.

Analisando-se os resultados obtidos com este trabalho verificou-se que:

– Quando conectado diretamente à fase o protótipo respondeu na faixa de 2 kV a 60 kV. Para aplicações em tensões maiores, é necessário, em primeiro lugar, o desenvolvimento de isoladores maiores. Para conhecer a viabilidade de utilização deste tipo de sensor em altas tensões (138 KV), seria necessário um teste de campo, para saber se a mesma técnica pode ser utilizada ou se é necessário desenvolver uma nova tecnologia;

– Os resultados medidos em laboratório indicam a possibilidade de se fazer oscilografia (para avaliar a qualidade de energia da rede elétrica) utilizando o sensor de tensão desenvolvido, devido à sua alta sensibilidade e boa resposta em frequência;

– A faixa de atuação (o range de medida do sensor) poderá ser manipulada, dentro de limites, ainda a serem determinados em experimentos com tensões mais altas, ajustando a distância entre o dispositivo e a fase a ser medida, já que a variação da distância provoca uma variação na intensidade do campo elétrico;

- O empacotamento realizado mostrou-se bastante robusto, possibilitando a utilização do sensor de tensão nas condições adversas da rede de distribuição de energia elétrica;
- As variações da grade de Bragg com a temperatura são extremamente importantes neste tipo de sensor desenvolvido. Para pequenas variações de temperatura ambiente (alguns graus), o sistema sai do ponto de operação ideal, introduzindo erros inaceitáveis nos resultados medidos, o que impossibilitaria a utilização do sensor em aplicações fora de um ambiente com temperatura controlada;
- Foi apresentada uma solução inovadora e inédita para controlar o ponto de operação do sensor com grade de Bragg, através da utilização de uma segunda grade de Bragg, que opera como sensor de temperatura, e através da atuação, com um circuito de controle, na temperatura do diodo laser, o que causa uma variação no comprimento de onda da luz emitida;
- Foi desenvolvido um modelo elétrico equivalente do sistema óptico-elétrico-térmico de um sensor de grade de Bragg, que além de ser de grande utilidade no desenvolvimento deste tipo de sensores, é também uma ferramenta didática extremamente poderosa, permitindo a alunos que estejam iniciando cursos em sensores e atuadores possam entender e fazer medidas reais neste modelo de baixo custo e de fácil reprodução.
- Com o emprego de um sistema realimentado, é possível atuar na temperatura do laser de forma a manter o sistema laser-grade de Bragg estável e operando no ponto ótimo, independentemente da temperatura a que a grade sensora está submetida. Esta técnica inédita é extremamente promissora e pode permitir a realização de outros tipos de sensores com grade de Bragg com baixo custo.
- Com a técnica de controle do ponto de operação desenvolvida neste trabalho, está previsto a construção de sensores de tensão que podem ter custo final cerca de 5 vezes menor do que os existentes no mercado.

Finalmente, gostaríamos de deixar uma sugestão para a continuação do trabalho, que é justamente a construção de um novo sensor com dupla grade de Bragg usando a técnica desenvolvida.

Para que esse trabalho possa ser realizado, entretanto, é necessária a obtenção de um financiamento da ordem de algumas dezenas de milhares de dólares, já que todos os componentes são extremamente caros e um novo protótipo, construído com a técnica apresentada, certamente levará de 12 a 18 meses para ser realizado e efetivamente transformado em produto.

De qualquer forma, lembrando que os sensores comerciais existentes custam algo em torno de US\$ 1.000,00 por KV, o investimento na continuação de desenvolvimento da técnica apresentada nesta tese pode ser de alto retorno financeiro.

Referências Bibliográficas

- [1] Ayres Neto, J. B. M. et. al; Estado da Arte em Tecnologias de Sensores Ópticos à Fibra Requisitos do Sistema de Monitoração de Sensores - versão AA. PD.33.ER.TRO.0014A/RT-01-AA. Campinas CPqD, mar/2004. (Relatório Técnico, Cliente: Bandeirante Energia S/A, atividade: 1118, processo: SQ4437/03).
- [2] W. F. Giozza, E. Conforti, H. Waldman, "Fibras Ópticas: Tecnologia e Projeto de Sistemas", 1991. vol. I, pp. 330-361.
- [3] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR13487: Fibras ópticas tipo multimodo índice gradual - Especificação. 2000.
- [4] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR13488: Fibras ópticas tipo monomodo de dispersão normal - Especificação. 2000.
- [5] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR13602: Fibras ópticas tipo monomodo de dispersão deslocada - Especificação. 2000.
- [6] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR13604: Fibras ópticas tipo monomodo de dispersão deslocada e não-nula - Especificação. 2000.
- [7] UERJ- Laboratório de Instrumentação e Fotônica. Disponível em: <<http://www.lif.coppe.ufrj.br>>.
- [8] Andonovic, Ivan; Uttamchandani, Deepak. Principles of Modern Optical Systems. Norwood, 1989, pp. 357-431.
- [9] Baldini, F., and A. Mignani. 1994. In-vivo biomedical monitoring by fiber optic systems. Proc. 10th Optical Fibre Sensors Conference, SPIE 2360:80.
- [10] Bhatia, Journ Smart Mat Struct 4. 1995.

- [11] Bhatia; et al. Wavelength-tracked white light interferometry for highly sensitive strain and temperature measurements. *Electr Lett* 32, n.3, pp 247-248, fev. 1996.
- [12] Abeysinghe, Dasgupta, et al. A Novel MEMS Pressure Sensor Fabricated on an Optical Fiber. *IEEE Photonics Tech Lett* 13, n.9, pp 993-995, set. 2001.
- [13] Xiao; Deng; Pickrell; May; Wang, Single-Crystal Sapphire Fiber-Based Strain Sensor for High-Temperature Applications, *Journ. Light Tech* 21, n.10, pp 2276-2283, out. 2003.
- [14] www.llnl.gov/sensor_technology/STR14.html, "Remote Electric Field Sensor", acessado em 08/01/2004.
- [15] Hill, Fuiji, Johnson, Kawasaki. Photosensitivity in Optical Fiber Waveguides: Applications to Reflection Filter Fabrication. *Appl. Phys. Lett.* 32, p 647, 1978.
- [16] Meltz; Morey; Glenn. Formation of Bragg Gratings in Optical Fibers by Transverse Holographic Method. *Opt. Lett.* 14, p 832, 1989.
- [17] Kashyap. *Opt. Fib. Technol.* 1, pp 17-34, 1994.
- [18] Lee. *Journ. of Light.Tech.* 9, pp 129-134, 1991.
- [19] Greene et al. *Proc. of the Conference on Smart Structures and Materials. SPIE'95*, paper 2444-05, fev.1995.
- [20] Sirkis. *Fiber Opt Smart Struct Skins IV, SPIE*, paper 1588, 1991.
- [21] Bhatia, Vengsarkar. Optical fiber long-period grating sensors. *Opt. Lett.* 21, pp 692-696, 1996.
- [22] Vengsarkar, Lemaire, Judkins, etc "Long-period fiber gratings band-rejection filters"*Journ. Light. Tech.* 14, pp 58-65, jan. 1996.
- [23] Patrick et. al. Hybrid fiber Bragg grating/long period fiber. *IEEE Photonics Letters* 8, pp 1233-1225, set. 1996.
- [24] Patrick et. al. Long period fiber gratings for structural bend sensing. *Electr. Lett.* 34, pp 1773-1775, 1998.
- [25] Lin, Wang, Chern-Jarn. Corrugated long period fiber gratings as strain, torsion, and bending sensors. *Journ. Light. Technol.* 19, pp 1159-1168, ago. 2001.

- [26] Zhang, Liu, Everall, et al. Design and Realization of Long-Period Grating Devices in Conventional and High Birefringence Fibers and Their Novel Applications as Fiber-Optic Load Sensors. IEEE Journ. of Selct. Topics in Quant.Electronics 5, set/out 1999.
- [27] Yun-Jiang, Yi-Ping. Novel Fiber-Optic Sensors Based on Long Period Fiber Gratings Written by High-Frequency CO₂ Laser Pulses. Journ. Light. Tech. 21, n.5, maio 2003.
- [28] Dong, Archambault et al. Single Pulse Bragg Gratings Written During Fibre Drawing. Electr. Lett. 29, n.17, pp 1577-1578, aug 1993.
- [29] Askins, Putnam et al, Stepped-wavelength optical-fiber Bragg grating arrays fabricated in line on a draw tower", Optics Let. 19, n.2, pp 147-149 jan 1994.
- [30] Hagemann, Trutzel et al. Mechanical resistance of draw-tower-Bragg-grating sensors. Electt. Lett. 34, n.2, jan. 1998.
- [31] Askins, Putnam et al. Fibre strength unaffected by on-line writing of single-pulse Bragg gratings. Electronics Letters 33, n.15, jul. 1997.
- [32] Dianov et al. Grating formation in a germanium free silicon oxidrine fiber. Eletr. Lett. Artigo preliminar.
- [33] Dianov et al. Nitrogen doped silica core fiber: A new type of radiation-resistanat fibre. Electr. Lett. 31, n.17, pp 1490-1491, 1995.
- [34] Eggleton et al. Novel Waveguide structures for enhanced fiber grating devices. IEEE Journ., on Select. Topics in Quantum. Electr. 7, n.3, pp 409-424, maio/jun 2001.
- [35] Szkopek et al. Novel multimode Fiber for Narrow-Band Bragg Gratings. IEEE Journ., on Select. Topics in Quantum Electr. 7, n.3, pp 425-433, maio/jun 2001.
- [36] Filippov et al. Fiber-optic voltage sensor based on a Bi₁₂TiO₂₀ crystal. Appl. Optics 39, n.9, pp 1389-1393, 20 mar. 2000.
- [37] Murooka et al. Modified Pockels sensor for electric-field measurements. IEE Proc. Sci. Measur. Technol. 141, n.6, pp 481-485, nov. 1994.
- [38] Sumiyoshitani. Study on Kerr electro-optic field measurement method for nonuniform three-dimensional electric field. IEE Proc. Scien. Measur. Technol. 141, n.5, pp 418-422, set. 1994.

- [39] Leite, R.L. et. al; Desenvolvimento do Sistema de Monitoração de Sensores - versão AA. PD.33.ER.TRO.0014A/RT-05-AA. Campinas CPqD, dez/2004. (Relatório Técnico, Cliente: Bandeirante Energia S/A, atividade: 1118, processo: SQ4437/03).
- [40] Hortencio, C. A.; Ayres Neto, J. B. M. et. al; Desenvolvimento dos sensores ópticos - Sensor de tensão - versão AA. PD 33.ER.TRO.0014A/RT-04-AA. Campinas CPqD, dez/2004. (Relatório Técnico, Cliente: Bandeirante Energia S/A, atividade: 1118, processo: SQ4437/03).
- [41] FERREIRA, E.C. Nova Técnica de Processamento de Sinais de Girômetros e Fibras Óptica para Sistemas de Navegação Inercial. Tese de livre docência. UNICAMP, 2001.
- [42] NASCIMENTO, A. R. Z. Et all. Circuitos Amplificadores de Transimpedância Integrados a Fotodiodos, Revista Científica Periódica Telecomunicações V. 02, N. 02, setembro de 1999.
- [43] NICOLSI, D.E.C. Laboratório de Microcontroladores (Família 8051). São Paulo: Érica, 2004.
- [44] NICOLSI, D.E.C., BROZERI, R.B. Microcontrolador 8051 com Linguagem C. São Paulo: Érica, 2005.
- [45] NICOLSI, D.E.C. Microcontrolador 8051 Detalhado. São Paulo: Érica, 2000.
- [46] PERTENCE, A. J. Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos São Paulo McGraw-Hill, 1988.
- [47] TEXAS INSTRUMENTS Handbook of Operational Amplifiers Applications. SBOA092A. Bruce. Carter and Thomas R. Browns. October 2001.
- [48] TEXAS INSTRUMENTS Handbook of Operational Active RC Networks. SBOA093A. Bruce Carter and L. P. Huelsman. October 2001.
- [49] BORIN, F. LEITE, R. L., COSTA, E. F. e HORTÊNCIO, C. A. "Desenvolvimento dos Sensores Ópticos, Sensor de Tensão" CPqD, Campinas, SP. Relatório Técnico. PD 33.ER.TRO.0014A/RT-04-AA, Dez. 2004.
- [50] LEITE, R. L, AYRES, J. B., COSTA, E.F. e HORTÊNCIO, C. A. "Desenvolvimento dos Sensores Ópticos. Sensor de Tensão— Parte 3" CPqD, Campinas, SP— Relatório Técnico. PD 33.ER.TRO.0014A/RT-09AA, Dez. 2005.
- [51] LEITE, R. L, COSTA, E.F. e HORTÊNCIO, C. A. "Desenvolvimento dos Sistema de Monitoração de Sensores, Parte 3" CPqD, Campinas, SP, Relatório Técnico. PD 33.ER.TRO.0014A/RT-07AA, Set 2005.

-
- [52] Regazzi, Rogério Dias; Pereira, Paulo Sérgio e Silva Jr, Manoel Feliciano. "Soluções Práticas de Instrumentação e Automação – Utilizando a programação Gráfica LabView" Rio de Janeiro, 2005.
- [53] Yan-Ju, Likam Wang, Horng-Shyang Chen, Chih-Chung Yang, and Wen-Fung Liu. "Multipoint temperature-independent fiber-Bragg-grating strain-sensing system employing an optical-power-detection scheme". Applied Optics, vol 41, No.9, 20 march de 2002.