

Eduardo Ferreira da Costa

**NOVA TÉCNICA ELETRÔNICA PARA MEDIDA DE  
TEMPERATURA COM RESOLUÇÃO DE 0,5 m°C USANDO  
SENSORES DE FIBRAS ÓPTICAS COM GRADES DE BRAGG**

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

Orientador: Prof. Dr. José Antonio Siqueira Dias

Campinas, SP  
2009

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

C823n Costa, Eduardo Ferreira  
Nova técnica eletrônica para medida de temperatura com resolução de 0,5 m°c usando sensores de fibras ópticas com grades de bragg / Eduardo Ferreira da Costa. –Campinas, SP: [s.n.], 2009.

Orientador: José Antônio Siqueira Dias.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Instrumentos de medição de temperatura. 2. Controle de temperatura. 3. Fibras óticas. 4. Detectores oticos. 5. Grades de difração. I. Dias, José Antonio Siqueira . II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Título em Inglês: New electronic technique for temperature measurement with 0.5 m°C resolution using optical fiber bragg gratings.

Palavras-chave em Inglês: Temperature measuring instruments, Temperature control, Optical fibers, Optical detectors, Diffraction gratings.

Área de concentração: Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica.

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora: Elnatan Chagas Ferreira, Rogério Lara Leite.

Data da defesa: 17/12/2009

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

Eduardo Ferreira da Costa

**NOVA TÉCNICA ELETRÔNICA PARA MEDIDA DE  
TEMPERATURA COM RESOLUÇÃO DE 0,5 m°C USANDO  
SENSORES DE FIBRAS ÓPTICAS COM GRADES DE BRAGG**

# Resumo

Por serem eletricamente passivos e imunes à interferência eletromagnética, os sensores a fibra óptica estão se tornando uma excelente escolha para o sensoriamento em várias aplicações, como aeroespacial, distribuição e geração de energia elétrica, transportes ferroviários, e equipamentos de segurança militares. Entre outras vantagens está o fato de que os sinais medidos podem ser transmitidos em distâncias muito grandes (da ordem de quilômetros), são compactos e leves.

A técnica de medida convencional com sensor à FBG necessita de equipamentos de custo muito elevado, tornando-se inviável para aplicações de baixo custo. Neste trabalho apresenta-se uma nova técnica para medir temperatura com sensores a fibra óptica com grades de Bragg. Resultados experimentais de medidas feitas com a técnica desenvolvida mostram que é possível obter uma resolução de 0,5 m°C em medidas realizadas numa faixa de 30°C.

**Palavras-chave:** Sensores de temperatura, fibra óptica, circuitos eletrônicos, medida de temperatura.

# Abstract

Due to the characteristic of being electrically passive and immune to electromagnetic interference, optical fiber sensors are becoming an excellent choice for several applications, as aerospace, distribution and generation of electrical energy, railway transports, and military equipment. Among other advantages, these sensors are compact, light and the measured signals can be transmitted for very long distances (in the order of kilometers).

The existing techniques for temperature measurement using FBG sensors need expensive equipments, and therefore are not suitable for low cost applications. In this work a new technique to measure temperature with a extremely high resolution using FBG sensors is presented. Experimental results of measurements carried out with the proposed technique show that a resolution of 0.5 m°C was obtained for measurements performed over a 30 °C temperature range.

**Keywords:** Temperature sensors, optical fibers, electronic circuits, temperature measurements.

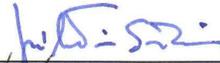
## COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

**Candidato:** Eduardo Ferreira da Costa

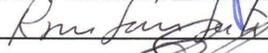
**Data da Defesa:** 17 de dezembro de 2009

**Título da Tese:** "Nova Técnica Eletrônica para Medida de Temperatura com Resolução de 0,5 m°C Usando Sensores de Fibras Ópticas com Grades de Bragg"

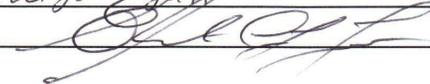
Prof. Dr. José Antonio Siqueira Dias (Presidente):



Dr. Rogério Lara Leite:



Prof. Dr. Elnatan Chagas Ferreira:



# Agradecimentos

A Deus pela oportunidade.

Ao professor Dr. José Antonio Siqueira Dias pela sua orientação, amizade, atenção e oportunidade concedida a mim neste trabalho.

Ao professor Dr. Elnatan Chagas Ferreira pela ajuda e amizade.

À Bandeirantes Energia pela oportunidade de realizar minha tese de mestrado no projeto de pesquisa e desenvolvimento da ANEEL.

Aos amigos da Fundação CPqD João Batista de Mello Ayres Neto, Claudio Antônio Hortêncio, Rogério Lara Leite e Paulo José Pereira Curado, pois sem os mesmos este trabalho não seria realizado.

Aos meus pais pelo carinho, apoio e paciência durante esta jornada

A minha noiva Ana Cecilia pelo amor, carinho e paciência.

Ao meu irmão, minha vó e minha tia pelo apoio e carinho.

*Aos meus pais, José Geraldo e Helenice.*

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>x</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
<b>Glossário</b>	<b>1</b>
<b>2 Grade de Bragg</b>	<b>4</b>
2.1 Grade de Bragg em fibra . . . . .	4
2.2 Operação da FBG . . . . .	6
2.3 Método de medição convencional . . . . .	9
<b>3 Método proposto</b>	<b>11</b>
3.1 Nova Técnica . . . . .	11
3.2 Equação característica para cálculo de temperatura da grade sensora . . . . .	14
<b>4 Desenvolvimento do Hardware</b>	<b>17</b>
4.1 Alimentação . . . . .	17
4.2 Controlador PID . . . . .	18
4.3 Controle de Potência . . . . .	20
4.4 Controle do TEC . . . . .	21
4.5 Transimpedância . . . . .	22
4.6 Driver do TEC . . . . .	23
4.7 Circuito de Proteção . . . . .	23
4.8 Conversor . . . . .	25
4.9 Conversor Digital-Analógico . . . . .	25
4.10 Conversor Analógico-Digital . . . . .	26
4.11 Comunicação Serial - RS232 . . . . .	27
4.12 Firmware . . . . .	27
4.13 Emuladores . . . . .	29
<b>5 Implementação do hardware</b>	<b>34</b>
5.1 Placa de Circuito Impresso . . . . .	34
5.2 Comunicação Serial . . . . .	34
5.3 Software . . . . .	34
5.4 Comparativo de sensores . . . . .	35

---

5.5	Dificuldades Encontradas . . . . .	35
<b>6</b>	<b>Resultados Experimentais</b>	<b>40</b>
6.1	Ensaio na Câmara Climática . . . . .	40
6.2	Montagem e Ensaio no Elemento Sensor . . . . .	40
6.3	Ensaio no Termistor . . . . .	42
6.4	Ensaio do Sistema de Medição . . . . .	42
6.5	Teste em laboratório . . . . .	44
<b>7</b>	<b>Conclusões e considerações finais</b>	<b>47</b>
	<b>Referências bibliográficas</b>	<b>48</b>

# Lista de Figuras

1.1	Especificações dos sensores a rede de Bragg em fibra óptica - Gávea Sensors. . . . .	1
1.2	Configurações disponíveis dos sensores a rede de Bragg em fibra óptica - Gávea Sensors. . . . .	2
1.3	Equipamento de medição - OSA. . . . .	3
2.1	Estrutura de uma grade de Bragg construída no eixo do núcleo, onde $n$ é o índice de refração do núcleo e $n + \Delta n$ é o índice da grade e $n + \Delta n$ é o índice máximo. . . . .	5
2.2	FBG de estrutura simples. . . . .	6
2.3	Mecanismo de operação de uma grade de Bragg em fibra tendo como fonte de luz um LED super luminescente com espectro largo. Parte da luz propagante, com comprimento de onda $\lambda_b$ é refletida pela grade e parte, com $\lambda$ diferente de $\lambda_b$ , é transmitida pela grade. . . . .	7
2.4	Uma FBG operando como sensor de temperatura. A temperatura é transferida para o transdutor na qual a FBG está fixada. . . . .	8
2.5	Diversos sensores distribuídos em pontos separados, operando em rede, com uma única fonte de LEDs com potência óptica alta é possível monitorar diversos parâmetros utilizando uma única fibra [7]. . . . .	9
2.6	Esquema de montagem para fazer ensaio de sensores distribuídos. . . . .	10
2.7	Gráfico do resultado das medições para caracterização do sensor de temperatura. . . . .	10
3.1	Esquemático da Técnica Proposta . . . . .	11
3.2	Espectro do Laser . . . . .	12
3.3	Diagrama de bloco do sistema . . . . .	12
3.4	Compensação da sintonia $\lambda_b$ para diferentes temperaturas . . . . .	14
3.5	Divisor resistivo do termistor . . . . .	15
4.1	Diagrama de bloco do Hardware . . . . .	17
4.2	Circuito de Alimentação . . . . .	18
4.3	Diagrama de bloco do controle PID . . . . .	19
4.4	PID analógico . . . . .	20
4.5	Diagrama de bloco do controle . . . . .	20
4.6	Esquema Elétrico do Controle da Potência . . . . .	21
4.7	Esquema Elétrico do Controle do TEC. . . . .	22
4.8	Simulação do controlador PID . . . . .	22
4.9	Transimpedância . . . . .	23
4.10	Driver do TEC . . . . .	24

---

4.11	Driver do TEC . . . . .	24
4.12	DAC0800 . . . . .	25
4.13	DAC Com Saída Simétrica . . . . .	26
4.14	Pacote de transmissão de 1 byte . . . . .	27
4.15	CI MAX232 . . . . .	27
4.16	Diagrama de bloco do firmware . . . . .	28
4.17	Fluxograma do Firmware . . . . .	30
4.18	Fluxograma da Proteção . . . . .	31
4.19	Emulador do Laser . . . . .	32
4.20	Emulador da grade de Bragg . . . . .	33
5.1	Esquema elétrico . . . . .	36
5.2	Layout da placa de circuito impresso . . . . .	37
5.3	Placa de circuito impresso montada . . . . .	38
5.4	comunicação com o usuário . . . . .	38
5.5	Software para tratamento dos dados . . . . .	39
6.1	Espectro da grade de Bragg sensora . . . . .	41
6.2	Gráficos dos resultados das medições para caracterização do sensor de temperatura utilizando SLED. . . . .	41
6.3	Caracterização do sensor de temperatura a -35, 20, e 80°C. . . . .	42
6.4	Curva do termistor. . . . .	43
6.5	Lambda em função da temperatura do laser. . . . .	43
6.6	Lambda em função da temperatura do sensor a FBG. . . . .	43
6.7	Laser em sintonia com a grade . . . . .	44
6.8	Ensaio na câmara climática. . . . .	45
6.9	Medida comparativa entre o sensor óptico e o termopar. . . . .	45
6.10	Gráfico do erro. . . . .	45

# Capítulo 1

## Introdução

O avanço tecnológico no ramo da óptica, proporcionado pelo setor de telecomunicações, e o decréscimo do preço dos componentes ópticos, propulsionaram um grande crescimento na área de sensores ópticos. Tecnologia de sensoriamento óptico está substituindo os sensores convencionais e tornando possíveis aplicações anteriormente ineficientes e/ou inviáveis.

Os sensores ópticos de temperatura são apropriados para várias aplicações e podem operar em ambientes ruidosos e agressivos devido às características intrínsecas da fibra óptica que apresenta bom dielétrico e imunidade eletromagnética. Além disto, este tipo de sensor é passivo e torna-se ideal para monitoramento da temperatura de condutores elétricos, sendo este o foco deste trabalho.

Ao pensarmos em medição de temperatura, é preciso estabelecer um compromisso entre faixa de temperatura medida e resolução necessária. Considerando que existem várias aplicações, nenhuma técnica tem uma alta resolução e pode abranger toda a faixa de temperatura que varia de  $-200\text{ °C}$  a  $4.000\text{ °C}$  [1]. Para sensores à FBG é razoável considerar uma faixa de operação de  $-100\text{ °C}$  a  $200\text{ °C}$ .

As tabelas 1.1 e 1.2 apresentam especificações normalmente encontradas para sensores com grade de Bragg em fibra óptica.

<i>Faixas de operação</i>	Deformação	$-4000$ a $4000\ \mu\text{m/m}$
	Temperatura	$-100$ a $125\text{ °C}$ ou $-100$ a $200\text{ °C}$
<i>Exatidão</i>	Deformação	$\pm 2\ \mu\text{m/m}$
	Temperatura	$\pm 0,1\text{ °C}$
<i>Resolução</i>	Deformação	$\pm 0,5\ \mu\text{m/m}$
	Temperatura	$\pm 0,03\text{ °C}$

Fig. 1.1: Especificações dos sensores a rede de Bragg em fibra óptica - Gávea Sensors.

Uma das possíveis aplicações dos sensores ópticos é na monitoração da temperatura de cabos de linhas de transmissão aéreas, que podem chegar a  $70\text{ °C}$  [1] quando operando em condições de sobrecarga no horário de pico. O aumento da temperatura faz com que aumentem as flechas nos vãos entre as torres, como consequência da dilatação térmica do material que compõe o condutor elétrico.

número de sensores por fibra	até 20
faixa de operação	1520nm a 1620nm *
largura espectral	0,8nm a 1,2nm
refletividade	0 - 90%
recobrimento	acrilato
comprimento do sensor	1mm
distância entre sensores	>1mm
conectores	FC/APC

\* A faixa de operação pode ser ampliada de 1300nm a 1650nm permitindo até 100 sensores em uma mesma fibra.

Fig. 1.2: Configurações disponíveis dos sensores a rede de Bragg em fibra óptica - Gávea Sensors.

Portanto, a temperatura é um parâmetro importante a ser medido, pois a tração do cabo varia em função da flecha e das variações ambientais no correr do dia [1]. Além disso, existe o aspecto da distância mínima que deve ser respeitada entre o cabo de transmissão e o solo.

Com o monitoramento da grandeza temperatura, pode-se aplicar o conceito de ampacidade, que é a corrente máxima que o fio suporta, respeitando a mínima distância de flecha no vão entre as torres. Com o aumento considerável da corrente que circula pelo fio e controlando a temperatura, estima-se uma melhora de até 15% no desempenho da rede de energia, sem alterar a infra-estrutura existente [2].

Para instalação do sensor de temperatura na secção do cabo, algumas preocupações devem ser ponderadas como, de qual material será construído o transdutor da temperatura para que haja transferência térmica homogênea. Outros cuidados são em relação à vedação do envólucro do sensor, para que não entre umidade, e a sua posição de instalação.

Considerando que o ambiente de operação do sensor de temperatura tem tensões elevadíssimas, deve ser analisado o aspecto da segurança. Portanto, torna-se necessária a utilização de buchas isoladoras, para que as poeiras e outras sujeiras acumuladas com o tempo na superfície da fibra óptica, não conduzam esta tensão.

A técnica de medida óptica convencional com sensores à FBG permite a operação de vários sensores ao longo da linha (distribuídos), compondo assim uma Rede de Sensores Ópticos, precisando de apenas uma fibra para levar e trazer o sinal multiplexado de cada sensor à central de controle da linha.

A necessidade da utilização do OSA na técnica convencional à FBG, torna algumas aplicações inviáveis devido ao elevado custo deste equipamento. Em contrapartida, a nova técnica proposta é economicamente viável, apresentando boa sensibilidade e resolução para o range de temperatura medido.

A figura 1.3 ilustra o equipamento OSA usado para a realização dos testes.

O sensor especificado na nova técnica de medição proposta neste trabalho é óptico e foi construído com uma grade de Bragg em fibra (Fiber Bragg Grating FBG), por ser sensível à temperatura, compacto, leve, ser um bom dielétrico, ser de baixo custo e ter imunidade à interferência eletromag-



Fig. 1.3: Equipamento de medição - OSA.

nética. Como mencionado anteriormente, estas características da fibra óptica tornam-na ideal para ser aplicado em ambientes de operações hostis, como o deste caso.

A FBG é sensível a tração mecânica ou variação de temperatura [4]. Portanto, os sensores a FBG permitem monitorar várias grandezas relacionada a variações mecânicas e são os mais atrativos para a nossa aplicação por serem sensíveis a temperatura.

A gravação da grade de Bragg em fibra óptica é feita por processo físico e não altera a propriedade mecânica e a composição química da fibra. A FBG pode ser feita em uma fibra monomodo de telecomunicações através da emissão de UV externamente. São adicionados alguns compostos nas fibras para melhorar a qualidade da grade e diminuir o tempo de gravação.

Os sensores a FBG permitem multiplexação de sinais de sensores que medem grandezas diferentes e estão distribuídos ao longo da fibra. Outra das muitas vantagens que podem ser citadas, é que o sensoriamento óptico permite interrogação de vários sensores pela mesma eletrônica e permite utilizar uma fonte de luz única que abranja todas as unidades sensoras ( $\lambda_{b's}$ ).

Os sensores a FBG distribuídos ao longo da fibra são discretos, sendo independentes entre si, e ficam sintonizados em comprimentos de ondas ( $\lambda_{b's}$ ) definidos ao longo do projeto. Na escolha deste  $\lambda_b$  deve ser respeitada uma distância para que não ocorra superposição em lambda dos sinais dos sensores a serem medidos. Apesar de utilizarem o mesmo meio físico, cada sensor pode medir uma grandeza diferente, como por exemplo: sensor 1 mede força, sensor 2 mede temperatura e sensor 3 mede pressão.

As FBG's são da ordem de 10 milímetros de comprimento e são filtros sintonizáveis. O princípio de operação é a reflexão dos  $\lambda_{b's}$  sintonizáveis ao longo da fibra e será melhor explicado no próximo capítulo.

# Capítulo 2

## Grade de Bragg

### 2.1 Grade de Bragg em fibra

O núcleo da fibra óptica é sensível a luz ultravioleta. A exposição da fibra em interferência de ultravioleta intenso modifica o índice de refração do núcleo. Este artifício é usado para fabricar as grades de Bragg em fibra, que são construídas inserindo variações periódicas no índice de refração ao longo do eixo do núcleo da fibra monomodo. Hill e Meltz demonstraram a primeira formação de grade permanente em fibra óptica em 1978 no Centro de Pesquisa de Comunicações do Canadá, em Ottawa [5].

Em 1989, Meltz, Morey e Glenn mostraram que era possível gravar uma modulação periódica no interior do núcleo a partir da região externa da fibra, submetendo-a a uma radiação UV transversa ao eixo do núcleo da fibra [6]. Com o processo de Meltz e Morey tornou-se possível controlar o  $\lambda_b$  requerido na gravação das FBG's a partir do meio externo, contribuindo também para reduzir o custo do processo atual.

A grade de Bragg apresenta um perfil de índice axial de acordo com a expressão periódica:

$$n(z) = n + \Delta n \cdot \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda}\right) \quad (2.1)$$

onde:

$\Lambda$  é o período axial da grade

$z$  a posição ao longo do eixo da grade

$\Delta n$  é a amplitude da perturbação local no índice de refração do núcleo induzida pela exposição da sílica dopada com germânio a radiação de UV.

A Figura 2.1 mostra a estrutura de uma FBG ao longo do eixo, formada no interior do núcleo de uma fibra monomodo com índice  $n$ .

A eficiência da grade é definida pela porcentagem de luz sintonizada que é refletida. Esta eficiência varia de 10 a 99,9% e isto é dado pelo incremento do índice de refração, que pode variar de 0,0001 a 0,005 e depende do material que compõe o núcleo e do tipo de grade.

Outro fator que contribui para a refletividade da grade é o comprimento da grade, pois cada período da grade contribui para refletir uma parcela da luz incidente.

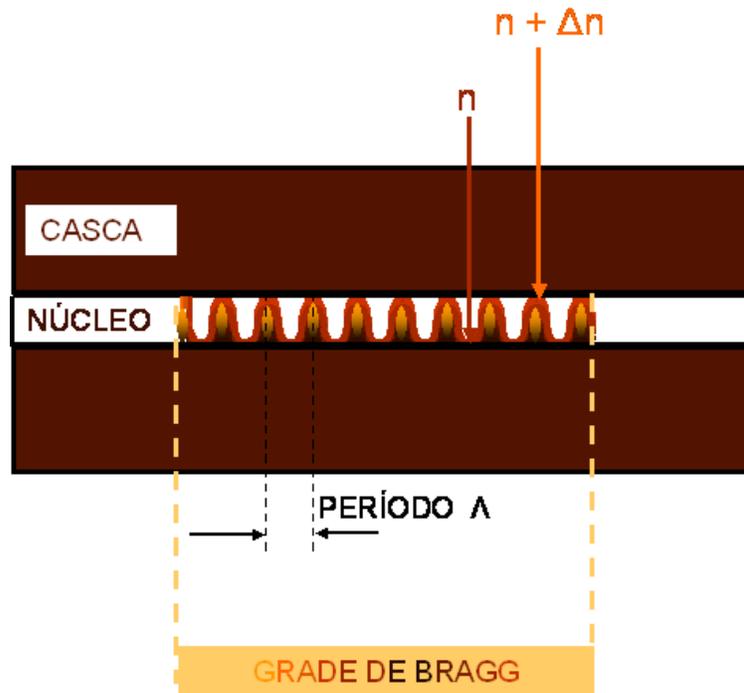


Fig. 2.1: Estrutura de uma grade de Bragg construída no eixo do núcleo, onde  $n$  é o índice de refração do núcleo e  $n + \Delta n$  é o menor valor de índice da grade e  $n + \Delta n$  é o índice máximo.

Para uma grade ser eficiente, a variação do índice de refração tem que ser indiretamente proporcional ao comprimento de gravação da grade. Portanto, para ter uma boa reflexão, a grade com  $\Delta n$  grande precisa ter um comprimento menor e as grades com  $\Delta n$  menores precisam de um comprimento maior.

A largura espectral  $\Delta\lambda$  de uma grade de Bragg simples corresponde ao espectro óptico da luz refiro-refletida pela grade, medido a meia altura. O delimitador da largura espectral é o comprimento de gravação da grade de Bragg, quanto maior a grade, mais estreito é o espectro.

O valor da largura espectral  $\Delta\lambda$  de uma grade está diretamente relacionada com os valores dos parâmetros de construção da grade na fibra. O  $\Delta\lambda$  de uma FBG pode ser aproximadamente expresso pela função 2.2 [28]. Observa-se que um dos fatores que contribuem para a largura espectral da grade é o seu comprimento: quanto maior a grade, mais estreito é o  $\Delta\lambda$ .

$$\Delta\lambda = \lambda_b s \left[ \left( \frac{\Delta n}{2n} \right) + \left( \frac{1}{N} \right) \right] \quad (2.2)$$

onde:

$N$  é o número de períodos

$S$  representa a reflexão. Para  $s = 1 \Rightarrow$  reflexão de 100%.

$\lambda_b$  é o valor em lambda da luz refletida

A área de sensoriamento foi bastante explorada durante os últimos 10 anos. Vários tipos de grade em fibra têm sido desenvolvidos para sensoriamento [27]. Dentre eles podemos citar a FBG, a LPG,

a grade *chirpped*, a grade inclinada, e a grade composta de grades sobrepostas.

A Figura 2.2 ilustra uma grade de Bragg com estrutura periódica simplificada. Esta é a estrutura utilizada nos sensores desenvolvidos deste trabalho.

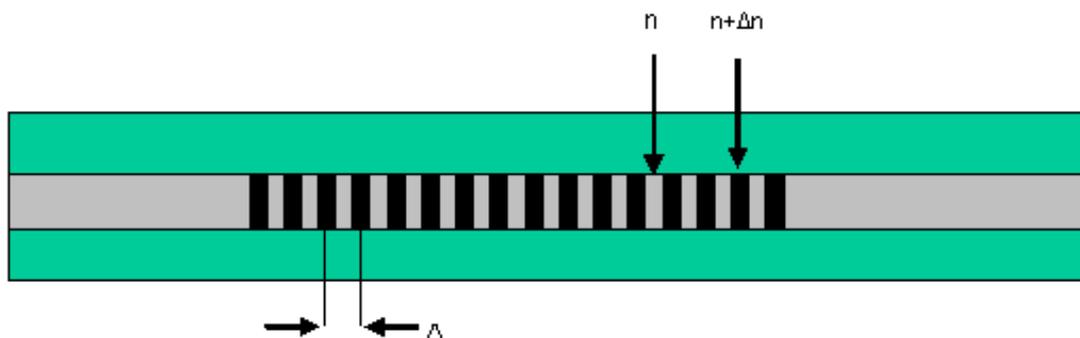


Fig. 2.2: FBG de estrutura simples.

## 2.2 Operação da FBG

Neste item, serão detalhados a aplicação, princípio de operação e desempenho da FBG simples como sensor de temperatura.

Conforme mencionado no capítulo 1, a FBG é sensível a tração mecânica e/ou variação de temperatura. Quando ocorre variação de temperatura ou tração mecânica, a sintonia  $\lambda_b$  da grade é deslocada, e isto é causado pela alteração no período da grade,  $\Lambda$ , e/ou pela mudança do índice de refração.

Para utilizar a FBG como sensor, geralmente, usa-se uma fonte de luz com espectro largo que abrange os  $\lambda_b$ 's das FBG's em uso. Desta forma, a FBG reflete uma fração da fonte de luz que está em sintonia com a grade e transmite o complemento desta luz acoplada a fibra.

A luz refletida pela grade de Bragg sofre uma mudança de fase de  $180^\circ$  em relação a luz transmitida. Cada período da grade reflete uma fração da luz transmitida que está em sintonia com a grade de Bragg. O comprimento de onda da luz propagante em sintonia é dado pela equação 2.3

$$\lambda_b = 2n_{ef}\Lambda \quad (2.3)$$

onde:

$n_{ef}$  é o índice de refração efetivo da grade. Este valor está acima do índice de refração do núcleo da fibra ( $n$ ) e abaixo do valor máximo da grade  $n + \Delta n$  [22].

$\Lambda$  é o período espacial da grade como mostra a Figura 2.1.

A figura 2.3 ilustra o princípio de operação da FBG. A luz transmitida por uma fonte de luz com espectro largo acopla e viaja pela fibra monomodo. Ao encontrar a grade parte da potência do  $\lambda_b$  é refletida, e o complemento da luz é transmitido.

Observa-se que o sinal transmitido pela fibra não sofre alteração. O espectro refletido pela FBG varia de 0,1 nm a 10 nm e deve ser especificado na compra.

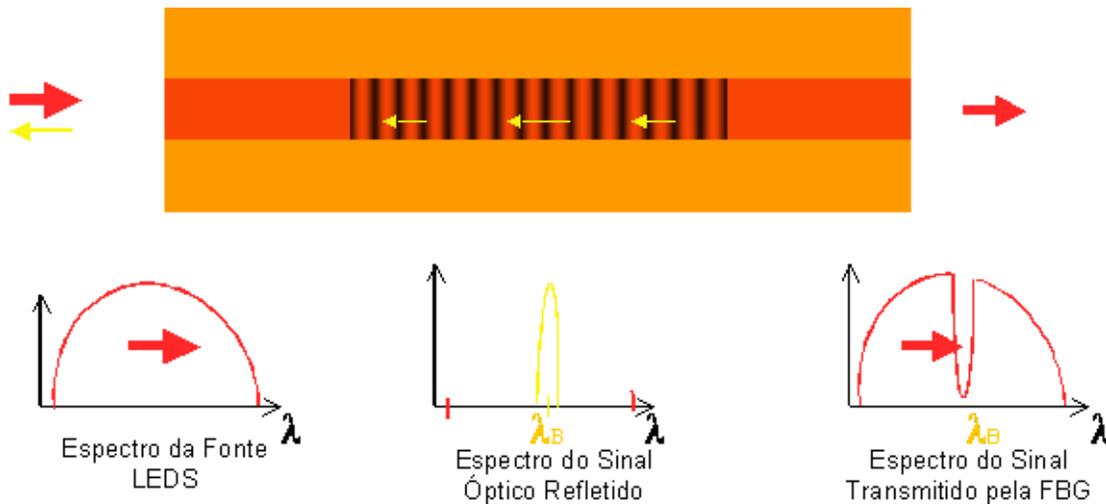


Fig. 2.3: Mecanismo de operação de uma grade de Bragg em fibra tendo como fonte de luz um LED super luminescente com espectro largo. Parte da luz propagante, com comprimento de onda  $\lambda_b$  é refletida pela grade e parte, com  $\lambda$  diferente de  $\lambda_b$ , é transmitida pela grade.

A análise do sensor de temperatura é dada pela equação 2.3. O  $\lambda_b$  é diretamente proporcional ao período e ao índice de refração da grade. Quando ocorre mudança na temperatura, acontece mudança no período e no índice de refração. Como ambos são função da temperatura, isto implica em mudança do  $\lambda_b$ . Observando esta variação de  $\lambda_b$  e tendo a curva característica do sensor à FBG, correlaciona-se  $\lambda_b$  a temperatura e assim descobre-se o valor absoluto da temperatura do material medido.

O efeito causado pela temperatura é mostrado na figura 2.4. Medindo as variações do  $\lambda_b$  causadas pelo resfriamento ou pelo aquecimento da fibra sensora, pode-se medir a temperatura indiretamente, pois o deslocamento espectral do  $\lambda_b$  da FBG do sensor é função da temperatura.

A FBG permite a multiplexação de várias grades na mesma fibra, podendo-se criar uma rede distribuída de sensores. Cada sensor pode medir uma grandeza diferente e não precisa saber a localização, pois basta saber apenas a sua sintonia em  $\lambda$  para identificar e distinguir os sensores. Esta configuração possibilita usar apenas uma fonte e um equipamento de medição em uma única fibra. A figura 2.5 ilustra uma rede distribuída de sensores.

O  $\lambda_b$  muda com temperatura e força, mas como o foco do trabalho é o monitoramento da temperatura, será desconsiderado o fator força para as análises a seguir.

Como o sensor a ser medido apresenta apenas variações com a temperatura, a equação 2.3 pode ser reescrita como:[21]

$$\lambda_b(T) = 2n_{eff}(T)\Lambda(T) \quad (2.4)$$

Derivando a equação 2.4 pela temperatura (T), temos:

$$d\lambda_b = 2\left(\Lambda \frac{dn_{eff}}{dT} + n_{eff} \frac{d\Lambda}{dT}\right)dT \quad (2.5)$$

e dividindo a equação 2.5 pela equação 2.3, obtemos:

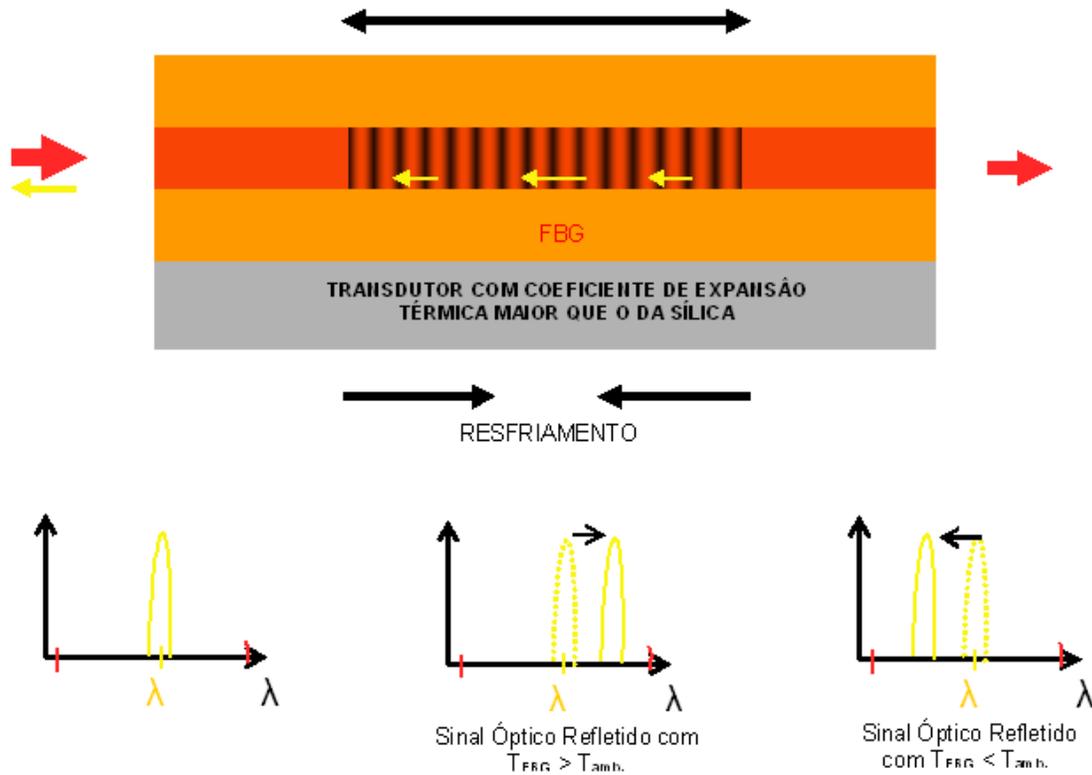


Fig. 2.4: Uma FBG operando como sensor de temperatura. A temperatura é transferida para o transdutor na qual a FBG está fixada.

$$\frac{d\lambda_b}{\lambda_b} = \left( \frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dT} + \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT} \right) dT \quad (2.6)$$

Fazendo,  $\frac{dn}{n_{eff}dT} = \zeta$ ,  $\frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT} = \alpha$  e substituindo na equação 2.6, fica:

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = (\alpha + \zeta) dT = K_T dT \quad (2.7)$$

onde:

$\alpha$  é o tensor térmico-óptico

$\zeta$  é o coeficiente de expansão térmica

$K_t$  é a sensibilidade térmica e é dado por  $\alpha + \zeta$ .

Conclui-se então que a variação de  $\lambda_b$ , apenas da temperatura, é dada pela equação 2.8

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} = K_T \cdot \Delta T \quad (2.8)$$

Atualmente, devido ao fato das FBG's serem feitas por compostos e técnicas de fabricação difer-

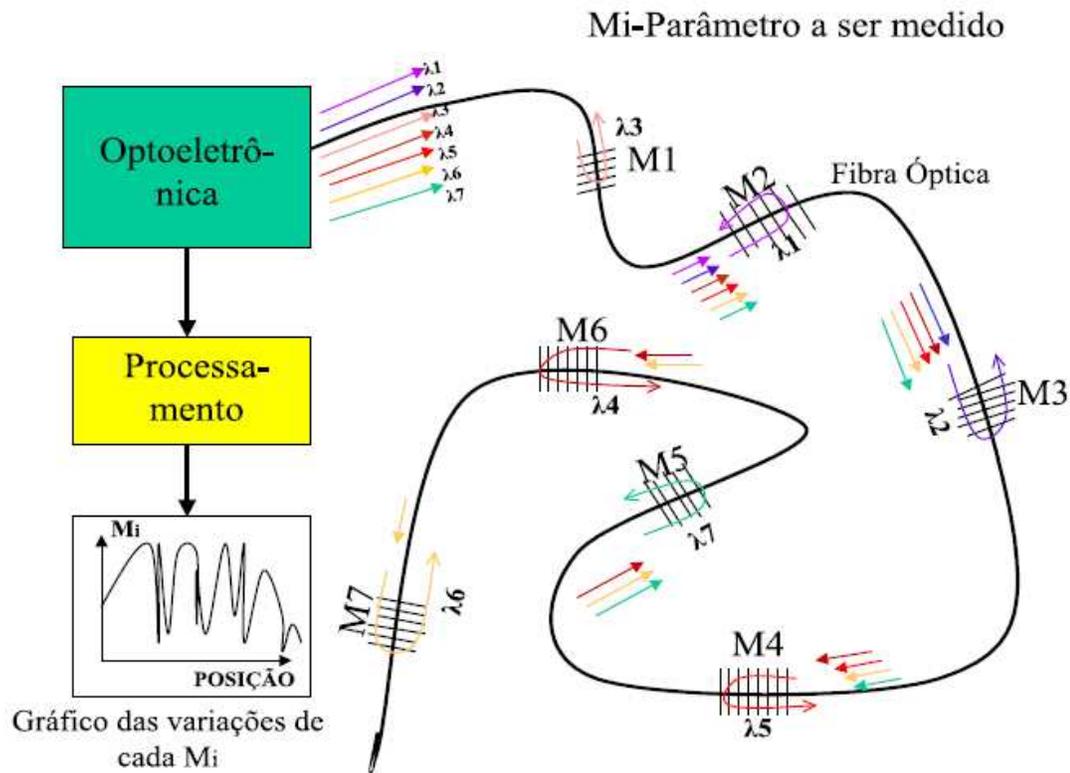


Fig. 2.5: Diversos sensores distribuídos em pontos separados, operando em rede, com uma única fonte de LEDs com potência óptica alta é possível monitorar diversos parâmetros utilizando uma única fibra [7].

entes, as propriedades de sensoriamento mudam, devendo ser feita uma calibração dos sensores antes de seu uso na prática.

## 2.3 Método de medição convencional

A configuração típica de montagem dos sensores distribuídos está esquematizada na figura 2.6. Geralmente é usada uma fonte óptica de banda larga para abranger todas as FBG's em série, pois a fibra permite multiplexar vários sinais de FBG's diferentes, inclusive cada grade pode medir grandezas diferentes.

Utilizando um Sled, que cobre os  $\lambda_b$  de todos os sensores, e um circulador óptico para enviar o sinal propagante à grade e receber os sinais refletidos da FBG's, consegue-se medir a mudança dos  $\lambda_{b,s}$  de cada sensor, através de um Analisador de Espectro Óptico ( Optical Spectrum Analyser - OSA) com resolução de 0,1 nm ou com um interrogador.

Com os dados provenientes do sistema de aquisição de dados medidos no OSA/interrogador, pode-se calcular o efeito de temperatura  $\lambda(T)$  sobre a unidade sensora que se expande ou contrai termicamente. E utilizando a equação do sensor de temperatura que foi calibrado anteriormente, obtem-se a temperatura absoluta do material medido.

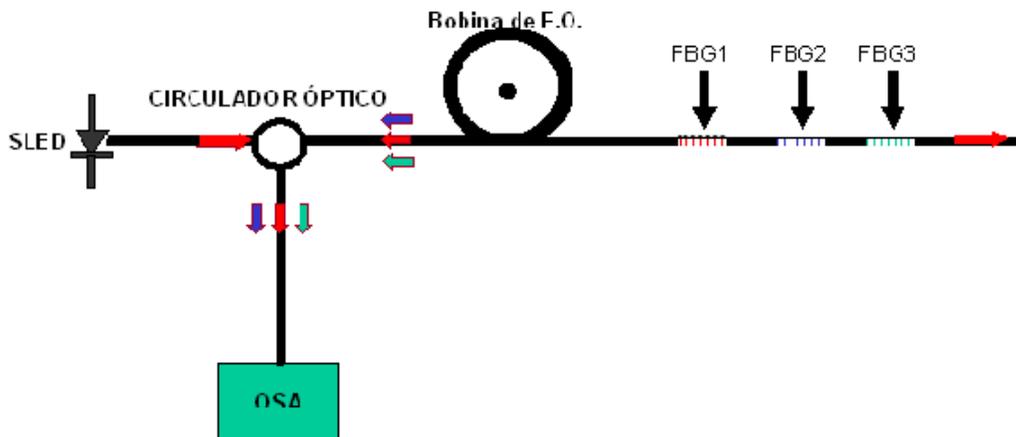


Fig. 2.6: Esquema de montagem para fazer ensaio de sensores distribuídos.

O gráfico da figura 2.7 mostra a curva característica e genérica de uma grade de Bragg que será utilizada como sensor de temperatura. Em geral, os sensores à FBG têm uma curva do comprimento de onda em função da temperatura linear e não apresentam histerese significativa entre as curvas de aquecimento e resfriamento.

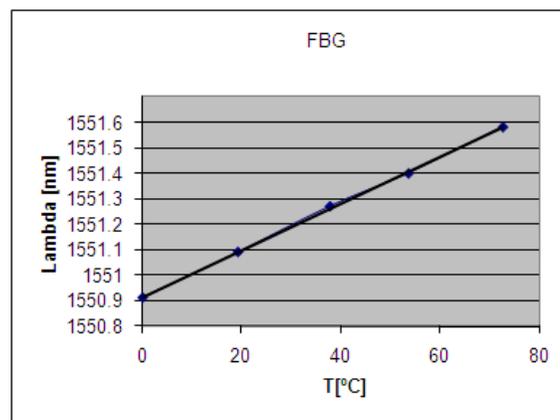


Fig. 2.7: Gráfico do resultado das medições para caracterização do sensor de temperatura.

Se este sensor não tiver resposta linear ou apresentar histerese, isto é devido ao transdutor usado para medir a grandeza desejada.

Medindo-se o comprimento de onda de sintonia da grade, calcula-se o valor de temperatura na unidade sensora.

# Capítulo 3

## Método proposto

### 3.1 Nova Técnica

O objetivo deste capítulo é demonstrar uma nova técnica, proposta deste trabalho, para medição de sensores de temperaturas que utilizam FBG.

Devido ao elevado preço do OSA/interrogador e a necessidade de monitoramento desta grandeza (temperatura), observou-se a necessidade de criar um método de medição mais econômico. Para tal, deve-se eliminar o OSA/interrogador, que é o equipamento mais economicamente inviável do processo.

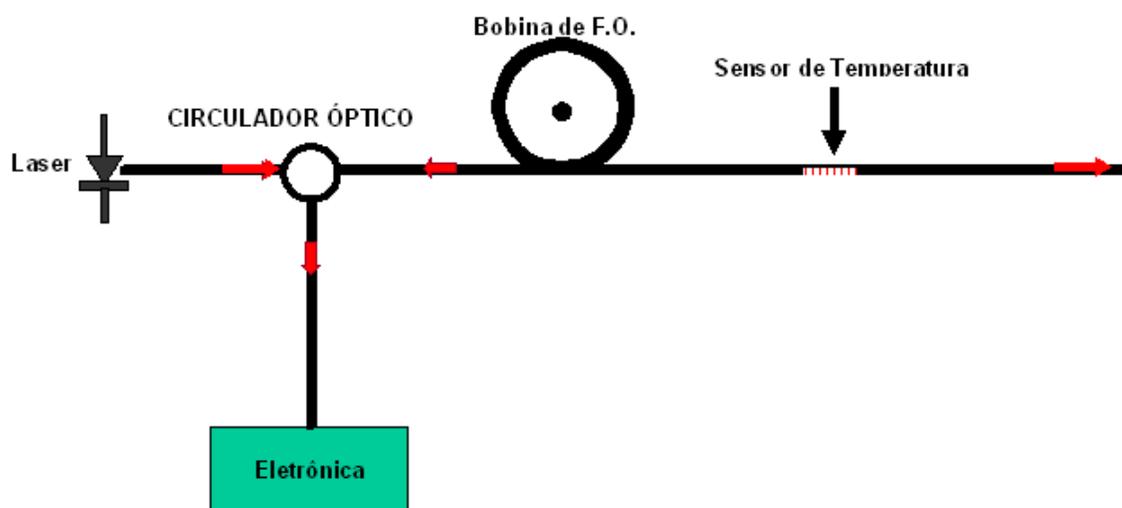


Fig. 3.1: Esquemático da Técnica Proposta

A figura 3.1 mostra o esquema da montagem óptica da técnica proposta. Observa-se que o Sled, utilizado na técnica convencional, foi substituído por um laser com uma largura espectral bem fina. O laser usado é do fabricante Eudyna, o modelo é FLD5F6CX-E34 e o espectro está ilustrado na figura

3.2. Como neste trabalho, mede-se apenas uma temperatura, foi colocado apenas um sensor ao longo da fibra óptica.

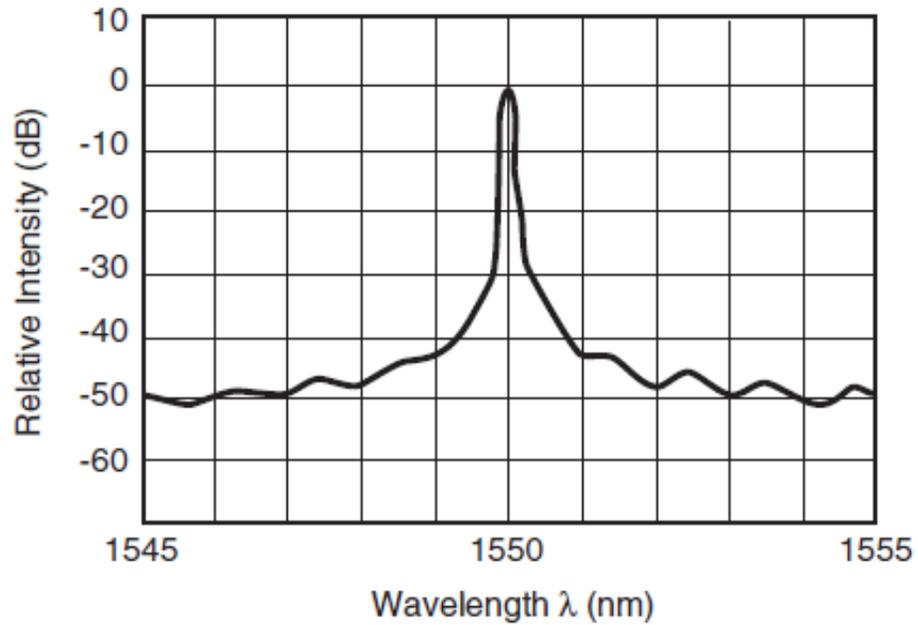


Fig. 3.2: Espectro do Laser

O diagrama de bloco do sistema proposto, incluindo a óptica e a eletrônica, esta representado na figura 3.3

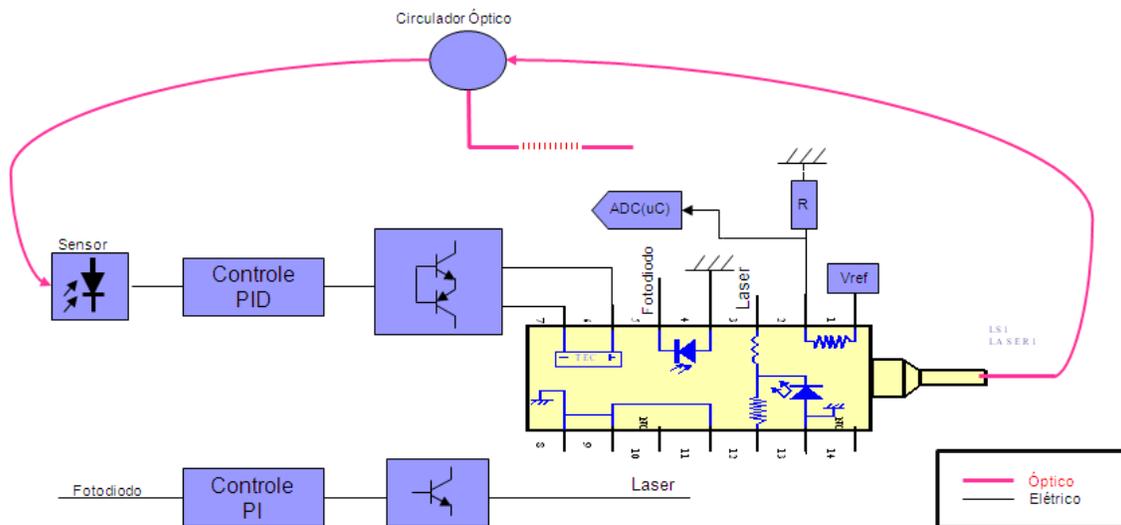


Fig. 3.3: Diagrama de bloco do sistema

Internamente ao laser, tem montado um TEC que é a abreviação de Thermo Electric Cooler, e este componente é baseado no Efeito Peltier, descoberto em 1834. Quando é aplicada corrente DC em dois materiais dissimilares, ocorre uma mudança de temperatura, onde um material esquenta e o outro esfria. Com a utilização deste efeito, é possível esquentar e esfriar o laser. Como o  $\lambda$  central do laser varia com a temperatura, usa-se este artifício do TEC para mudar a sintonia do laser com a grade.

Outro componente embutido ao laser é o termistor, ou seja, um resistor com coeficiente negativo que varia com a temperatura. Através da medida da resistência do termistor e do valor do coeficiente  $\beta$  do termistor (dado pelo fabricante), pode-se calcular a temperatura interna do laser.

O princípio de funcionamento deste método é trabalhar com o nível DC do laser que é refletido pela grade de Bragg.

A idéia é bem simples: sintonizar o laser com o espectro bem fino em uma componente espectral da derivada positiva da grade, e monitorar se houve variação no nível DC refletido. Qualquer mudança neste nível indica uma alteração de temperatura.

Os  $\lambda_{b,s}$  ressonantes que são refletidos pela grades de Bragg retornam um nível DC óptico. Quando a temperatura na grade é mantida constante, este nível DC não varia. Se a grade sensora tiver um acréscimo na temperatura, haverá uma redução na fração da componente do  $\lambda_b$  e conseqüentemente uma diminuição do sinal nível DC refletido que é detectado através do fotodiodo pela eletrônica.

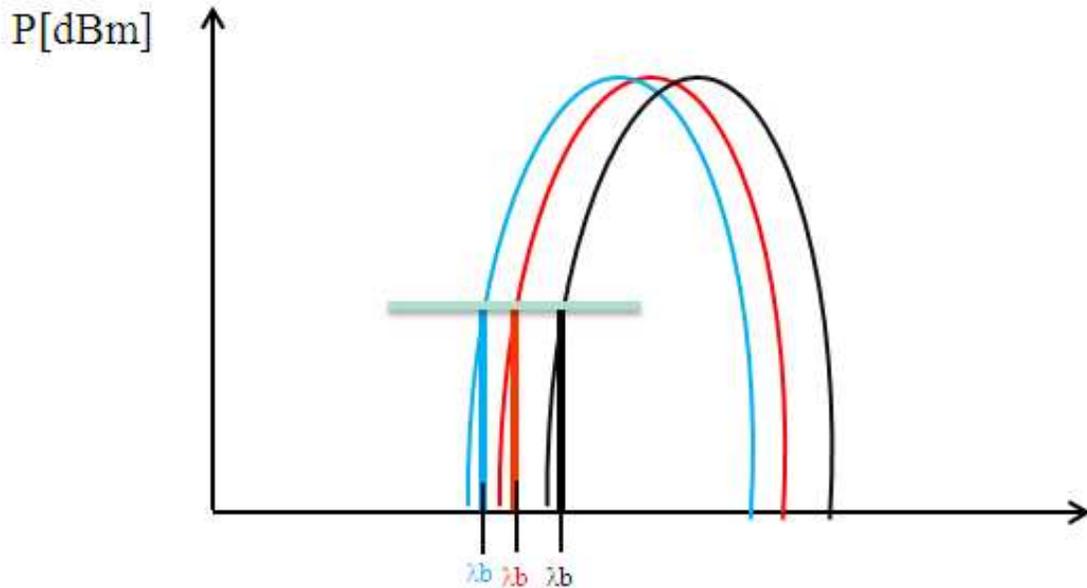
Se pensarmos no oposto, com o resfriamento da grade sensora, acontecerá um aumento na fração do  $\lambda_b$  existente anteriormente, implicando em um aumento do nível DC.

Qualquer oscilação da potência óptica do laser, implica em variação no nível DC que será subentendido pelo sistema como sendo mudança de temperatura. Para eliminar este efeito indesejável, foi feito um circuito eletrônico realimentado que mantém a potência óptica constante. A eletrônica que controla a potência do laser compara o valor de referência com uma fração da potência óptica emitida pelo laser, medida através de um fotodiodo interno ao laser, e o resultado da diferença destes dois valores (valor medido – valor de referência) é usado para compensar esta variação da potência óptica, injetando mais ou menos corrente no laser.

Da mesma maneira trabalha-se com o sinal refletido pela grade de Bragg, mas o princípio de operação é um pouco diferente. Escolhe-se um ponto aleatório para o laser trabalhar em sintonia com a grade e considera-se este valor como sendo o valor de referência da realimentação do circuito eletrônico. Se a temperatura variar, o valor medido difere do valor de referência. Para compensar esta variação na sintonia, altera-se o  $\lambda$  central do laser, garantindo que o laser volte para o ponto de trabalho na grade. Esta mudança do  $\lambda$  do laser é feito através do TEC, como dito acima.

A mudança da sintonia do laser para compensar a variação no nível DC pode ser vista na figura 3.4.

Depois de feita esta compensação causada pela mudança de temperatura na FBG, mede-se o valor do termistor do laser e calcula-se a temperatura indireta e absoluta da FBG. Levando em consideração que o  $\Delta\lambda$  do laser é de 2nm e a sensibilidade da grade de Bragg é de aproximadamente 0.01nm/°C, conclui-se que a faixa de operação em temperatura é de 200°C.

Fig. 3.4: Compensação da sintonia  $\lambda_b$  para diferentes temperaturas

### 3.2 Equação característica para cálculo de temperatura da grade sensora

Este item descreve o método utilizado para calcular a temperatura do sensor em função do lambda de sintonia do laser com o sensor de temperatura, ou seja, com a FBG.

A equação da reta da grade de Bragg é dada por:

$$\lambda_{grade} = S_{grade} \cdot T_{grade} + \lambda_{0grade} \quad (3.1)$$

onde:

$\lambda_{grade}$  é o lambda central da grade de Bragg

S é a sensibilidade da grade e será medido na prática, pois varia para cada fabricante de FBG.

Como a sintonia é um pouco deslocada do lambda central, podemos reescrever a equação 3.1 da seguinte maneira:

$$\lambda_b = S_{grade} \cdot T_{grade} + (\lambda_{0grade} - d) \quad (3.2)$$

onde:

$\lambda_b$  é o lambda de sintonia da grade de Bragg com o laser.

d é a diferença entre o lambda central da grade com o lambda de sintonia

Portanto:

$$T_{grade} = \frac{\lambda_b - (\lambda_{0grade} - d)}{S_{grade}} \quad (3.3)$$

Considerando que os valores de  $R_0$  e do  $\beta$  do termistor do datasheet são típicos, existe um desvio do valor real, para minimizar o acúmulo de erros, são feitas algumas medidas na prática para obtenção destes valores. Através de alguns dados extraídos destas medidas, é possível encontrar o valor real do coeficiente do termistor. A equação do termistor é dado pela equação 3.4.

$$R_{th} = R_0 \cdot e^{\beta \cdot (\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})} \quad (3.4)$$

O divisor resistivo que está ilustrado na figura 3.5 é utilizado para medir a temperatura interna do laser, já que esta é proporcional à temperatura absoluta da grade sensora.

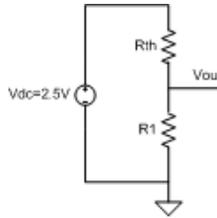


Fig. 3.5: Divisor resistivo do termistor

A equação da tensão do divisor resistivo,  $V_{th}$ , que é proporcional à temperatura da grade sensora é dada por:

$$V_{th} = \frac{5110 \cdot (2,5)}{R_{th} + 5110} \quad (3.5)$$

Substituindo-se a equação 3.4 na 3.5, deduz-se que a temperatura do laser, em °C, é:

$$T_{laser} = \left( \frac{1}{\frac{1}{\beta} \cdot \ln\left(\frac{1}{R_0} \cdot \left(\frac{12775}{V_{th}} - 5110\right)\right) + \frac{1}{T_0 + 273.15}} \right) - 273.15 \quad (3.6)$$

A equação característica do laser é dada pela equação 3.7.

$$\lambda_{laser} = \lambda_{0laser} + S_{laser} \cdot T_{laser} \quad (3.7)$$

Com a substituição da equação 3.6 na equação 3.7, deduz-se a equação 3.8 que é igual a  $\lambda_b$

$$\lambda_{laser} = \lambda_{0laser} + S_{laser} \cdot \left[ \left( \frac{1}{\frac{1}{\beta} \cdot \ln\left(\frac{1}{R_0} \cdot \left(\frac{12775}{V_{th}} - 5110\right)\right) + \frac{1}{T_0 + 273.15}} \right) - 273.15 \right] \quad (3.8)$$

Depois, a substituição da equação 3.8 na equação 3.3 resulta em:

$$T_{grade} = \frac{[\lambda_{0laser} + S_{laser} \cdot \left[ \left( \frac{1}{\frac{1}{\beta} \cdot \ln\left(\frac{1}{R_0} \cdot \left(\frac{12775}{V_{th}} - 5110\right)\right) + \frac{1}{T_0 + 273.15}} \right) - 273.15 \right]] - (\lambda_{0grade} - d)}{S_{grade}} \quad (3.9)$$

Portanto, a equação 3.9 é a equação característica do sensor de temperatura com FBG e será utilizada posteriormente para calcular a temperatura do corpo medido.

# Capítulo 4

## Desenvolvimento do Hardware

Este capítulo descreve o desenvolvimento do hardware. Os ítems a seguir explicam as funcionalidades de cada bloco dentro do sistema como um todo.

O diagrama de bloco do protótipo do hardware está na figura 4.1.

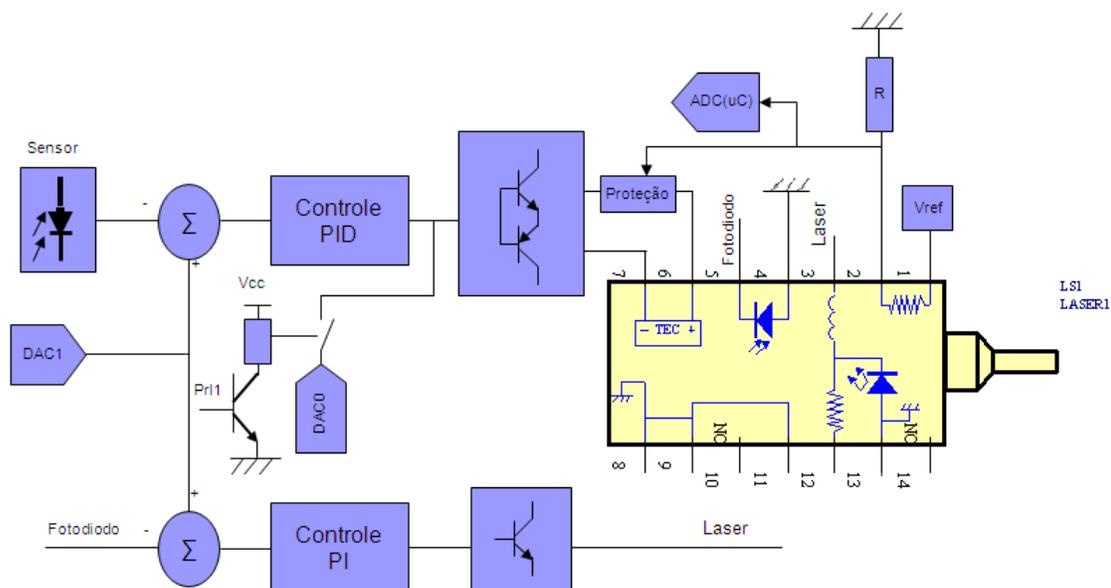


Fig. 4.1: Diagrama de bloco do Hardware

### 4.1 Alimentação

O sistema de controle está sendo alimentado por quatro fontes separadas que usam um transformador com dois rolamentos. No primeiro rolamento estão montados o 5V, para o circuito digital, a fonte de alimentação, com saída em  $\pm 12V$ , que fornece energia para o circuito analógico e neste rolamento encontra-se a fonte de alimentação do laser com partida soft-start.

Por ser um circuito de consome mais potência, o driver de potência do peltier é retirado do outro rolamento do transformador.

A literatura menciona que a maioria das queimas de lasers acontece no momento de ligar a alimentação do circuito. Na tentativa de reduzir a chance (probabilidade) de queima de laser, foi construída uma fonte de alimentação com partida soft-starter que é um dispositivo eletrônico que controla a tensão de partida da alimentação, aumentando-a gradativamente. Isto é feito para diminuir spike ao ligar a eletrônica, o que pode ser uma das causas ou contribuir para a queima do laser.

A figura 4.2 ilustra as 4 fontes de alimentação, inclusive o circuito do soft starter com constante de tempo de 1,25 segundos.

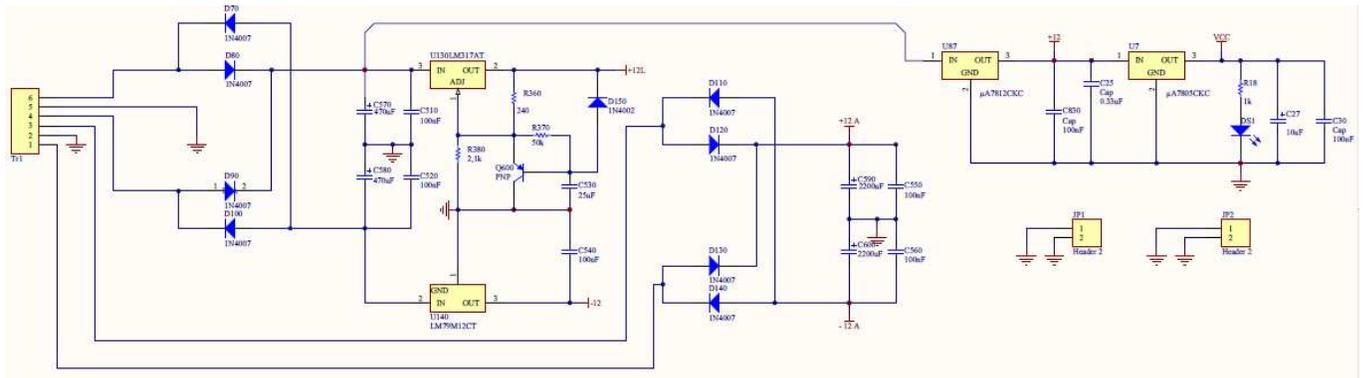


Fig. 4.2: Circuito de Alimentação

O circuito de soft-start funciona da seguinte maneira: ao ligar a alimentação da eletrônica, o transistor PNP está conduzindo e o capacitor C1 está carregando gradativamente. Depois de 1,25 segundos, o capacitor C530 está carregado e o transistor entra em corte. Portanto, após o tempo de recarga do capacitor, a equação deste circuito é dada por:

$$V_0 = V_{ref} \cdot \left(1 + \frac{R380}{R360}\right) + I_{adj} \cdot R380 \quad (4.1)$$

## 4.2 Controlador PID

Este item faz um breve descritivo do controlador PID que foi utilizado neste projeto. PID é a sigla de proporcional-integral-derivado e o princípio de funcionamento é controlar um processo, continuamente, através de um sistema de realimentação a sensores, e depois atuar no processo, desta forma corrigindo o erro.

O controle é constituído de diversos elementos:

- Planta, que é a parte física do atuador do sistema. Ex: driver do TEC;
- Sensor, que é o dispositivo que mede a variável;
- Setpoint, que é o valor desejado do sistema;

- Erro, que é a diferença entre o valor de setpoint e a resposta da planta, ou seja, (Erro=Setpoint – valor<sub>medido</sub>).

O diagrama de bloco do controle PID está ilustrado na figura 4.3.

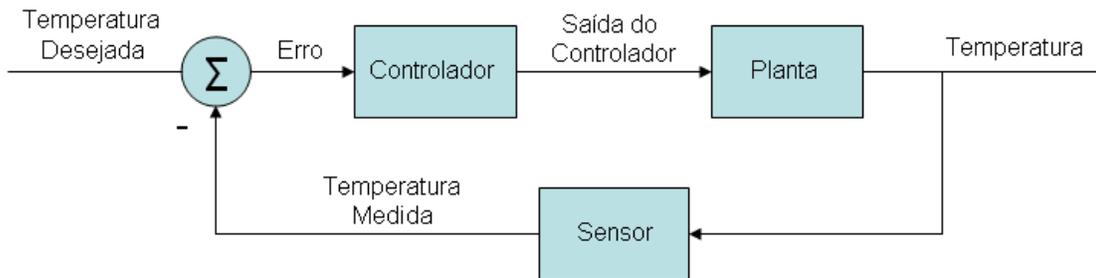


Fig. 4.3: Diagrama de bloco do controle PID

O cálculo do controlador PID é dado pela equação de  $u(t)$ .

$$U(t) = K_c \cdot \left( e + \frac{1}{T_i} \int e dt + T_d \cdot \frac{de}{dt} \right) \quad (4.2)$$

,no intervalo de 0 à t

onde:

$K_c$  = é o ganho proporcional

$T_i$  = é o tempo da integral

$T_d$  = é o tempo da derivada

$e$  = é o erro, sendo o valor de (Setpoint-valor<sub>medido</sub>)

O circuito PID analógico pode ser implementado através de amplificadores operacionais e várias topologias de circuito podem ser utilizadas.

A topologia mais comum está representada na figura 4.4 abaixo, entretanto esta topologia não foi usada. Cada estágio tem uma função no controle, sendo estes os operadores que integram a equação 4.2 (proporcional, integral e derivada). Portanto, a topologia da figura 4.4 pode ser expressa pela equação 4.3.

$$V_{out} = \frac{R_1}{R_2} \cdot \left( (V_e - V_{ref}) + \frac{1}{R_i C_i} \int (V_e - V_{ref}) dt + R_d \cdot C_d \cdot \frac{d(V_e - V_{ref})}{dt} \right) \quad (4.3)$$

Neste projeto, existem dois controles PID distintos, um para o controle de potência óptica do laser e outro para o controle da sintonia do laser. A figura 4.5 mostra o diagrama de bloco do controle que será detalhado nos itens a seguir.

Para projeto do PID foi escolhido o amplificador operacional OP07 por apresentar uma rejeição a ruído de modo-comum (CMRR) da ordem de 120 dB e ter um baixo *offset*.

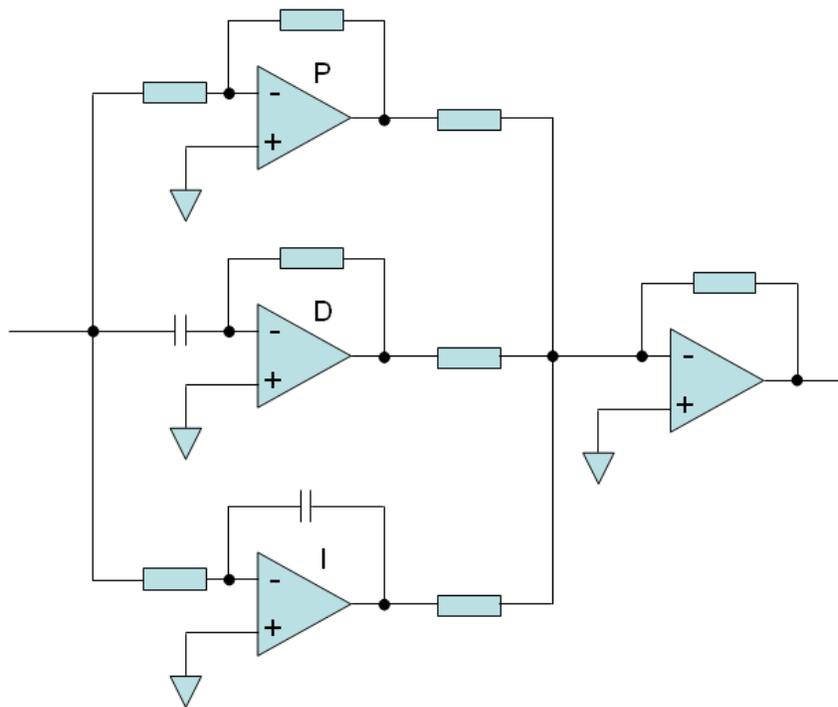


Fig. 4.4: PID analógico

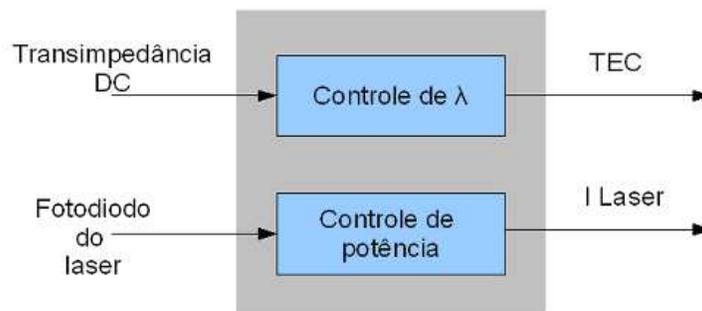


Fig. 4.5: Diagrama de bloco do controle

### 4.3 Controle de Potência

A eletrônica que controla a potência do laser foi projetada para que o sinal medido, proveniente do sensor, não seja mascarado por oscilações na potência óptica do laser.

Por ser um sistema com variação de processo lenta, não foi necessário implementar a parte da derivada do PID. Então, o tipo de controle escolhido e implementado foi o PI (proporcional-integral). O esquema elétrico do controle da potência está ilustrado na figura 4.6 e a tabela 4.1 mostra os valores das constantes do PI que foram utilizados.

O controle proporcional-integral trabalha da seguinte maneira: se o valor medido através do fo-

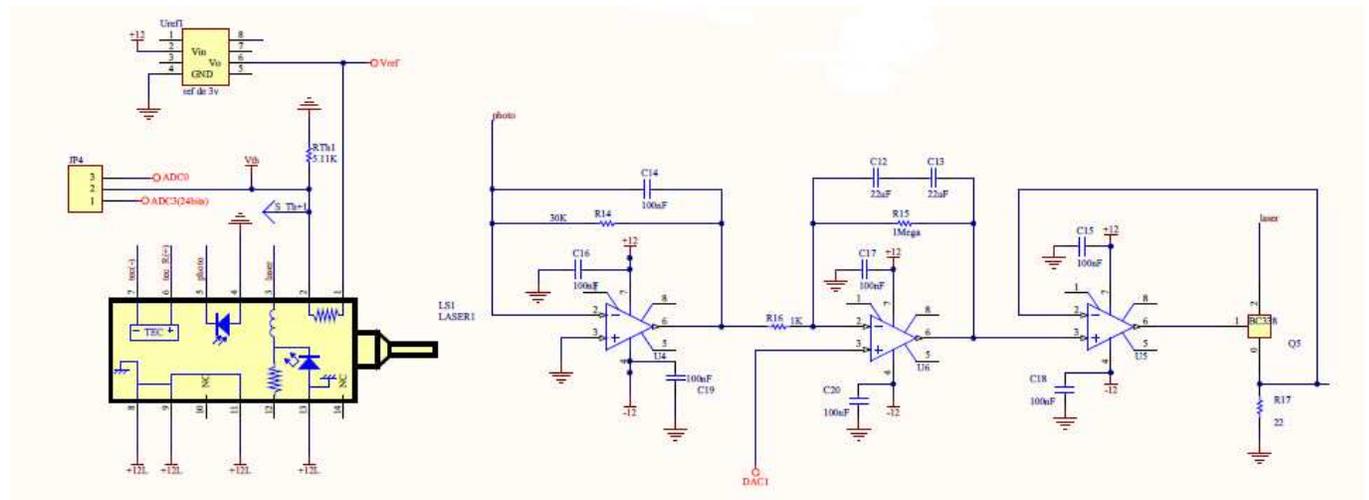


Fig. 4.6: Esquema Elétrico do Controle da Potência

Controlador	Kc	Ki
PI	1000	90

Tab. 4.1: Variáveis do controlador PI

todo o laser diferir do valor de set-point, o amplificador de erro do controlador PID irá corrigir, aumentando ou diminuindo o valor da corrente injetada no laser, para compensar esta variação de potência óptica.

A tensão de setpoint é 2.5V e os componentes externos foram calculados para uma potência óptica de laser de 1mW.

Para proteção do laser, foi colocado um diodo zener na base do transistor, desta forma garantindo que a corrente máxima no laser não ultrapasse 150 mA, conforme especificado no data sheet. Foi colocado um diodo reverso ao laser para evitar correntes reversas indesejáveis.

## 4.4 Controle do TEC

O TEC é utilizado para sintonizar o laser com o  $\lambda b$  da grade Bragg, esquentando ou resfriando o laser internamente. Para este circuito foi utilizado o controle PID, mencionado no item acima.

A topologia escolhida é diferente da convencional e, por ter menos componentes, diminui fontes de possíveis problemas. O esquema elétrico da figura 4.7 mostra a topologia implementada.

Foi feita a simulação de um controlador PID para um sistema com atraso de tempo de primeira ordem. A forma de onda simulada no Matlab está ilustrada na figura 4.8.

A tabela 4.2 mostra os valores das constantes do PID que foram utilizados.

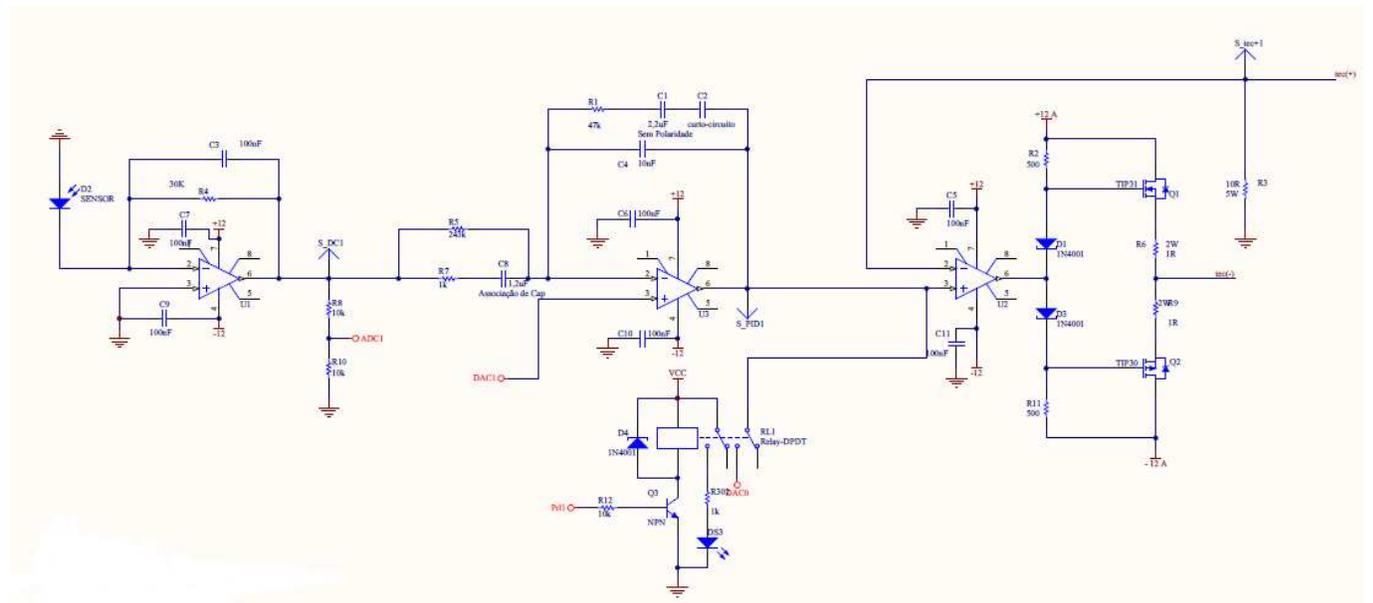


Fig. 4.7: Esquema Elétrico do Controle do TEC.

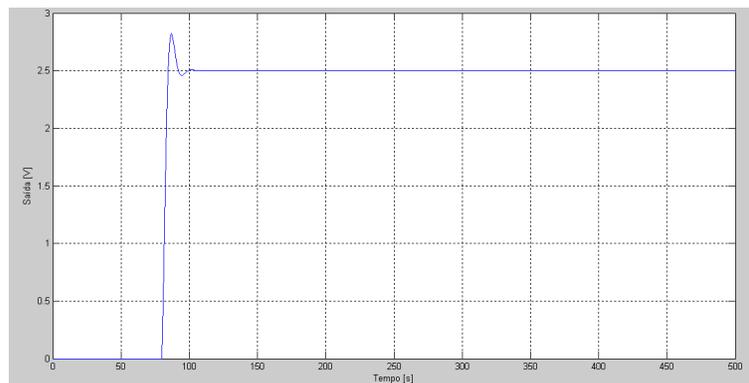


Fig. 4.8: Simulação do controlador PID

## 4.5 Transimpedância

A conversão do sinal óptico para o sinal elétrico é feita através do fotodiodo. O fotodiodo é um semiconductor do tipo PN que tem a propriedade de gerar corrente quando existe uma luz incidente sobre o elemento fotosensor.

A configuração do fotodiodo polarizado reversamente está ilustrada na figura 4.9.

A tensão de saída do circuito de transimpedância é dada por:

$$V_s = -Z_r \cdot i_p \tag{4.4}$$

Controlador	Kp	Ki	Kd
PID	0.18	1.87	0.04

Tab. 4.2: Variáveis do controlador PID

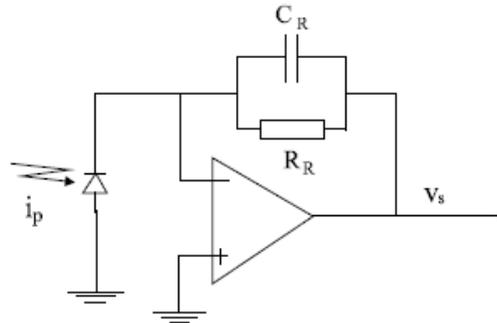


Fig. 4.9: Transimpedância

## 4.6 Driver do TEC

Foi implementado um driver de potência com amplificador classe AB para controle do TEC. Esta classe é um intermédio entre a classe A e a classe B, sendo um pouco menos eficiente que a classe B, pois tem uma pequena corrente de polarização na base, para eliminar o efeito de crossover, mas em contrapartida não tem distorção em pequenos sinais, como observado na classe A.

A distorção de crossover é causada quando pequenos sinais não são suficientes para polarizar os transistores, não colocando-os em condução. No caso do driver do TEC, a distorção de crossover pode ser desconsiderada pois, como o circuito está em malha fechada, a distorção é dividida pelo ganho da malha do amplificador operacional.

Este driver tem configuração simétrica, portanto existe controle para forma de onda completa. O transistor NPN conduz o ciclo positivo e o transistor PNP conduz no ciclo negativo.

O driver do peltier permite injetar e retirar corrente no TEC, permitindo que o laser esquente ou esfrie. Os limites de correntes do circuito estão definidos em  $\pm 1$  A.

## 4.7 Circuito de Proteção

Conforme especificado no data sheet, a temperatura interna do laser está limitada entre dois patamares,  $15^{\circ}\text{C}$  e  $35^{\circ}\text{C}$ . Para garantir que estes limites não sejam excedidos, foram feitos dois circuitos de proteção que monitoram o termistor, um por hardware e outro por firmware.

A primeira proteção é feita por hardware [3]. Toda vez que a temperatura interna do laser exceder os extremos de limites especificados, o comparador U18 coloca a saída em nível lógico '1', fechando o relé RL2 e interrompendo a circulação de corrente no peltier. Desta forma causando o aquecimento ou o resfriamento do laser e fazendo com que a temperatura volte a operar dentro do especificado, considerando que o laser está em um ambiente com temperatura controlada.

A figura 4.11 ilustra o diagrama de bloco da proteção por hardware [3].

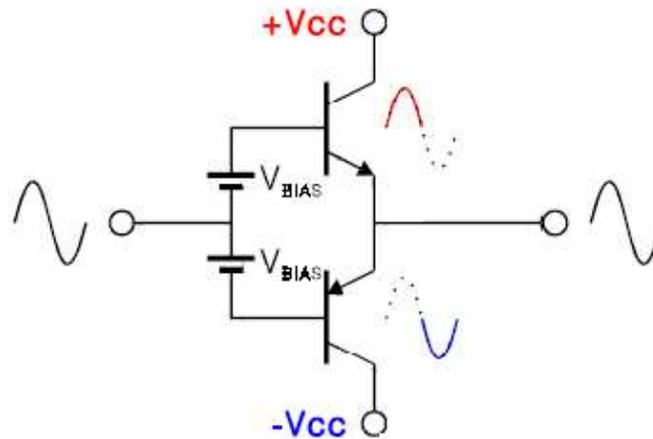


Fig. 4.10: Driver do TEC

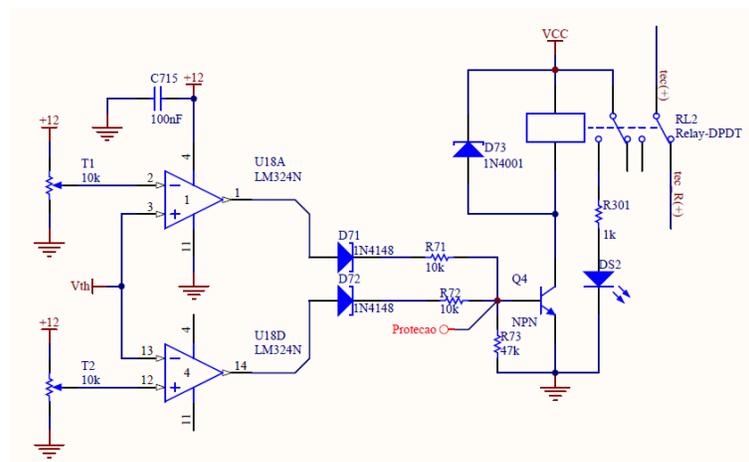


Fig. 4.11: Driver do TEC

A outra proteção é feita por firmware. Ao monitorar o termistor e constatar que houve excesso de limites de temperatura interna do laser, o firmware aciona o relé RL1 e coloca o DAC0 em '0' volts, fazendo com que o laser estabilize em 25°C.

O fluxograma da proteção por firmware está ilustrado na figura 4.18 do item 4.12 abaixo.

Embora uma proteção seja suficiente, foi feita uma redundância por precaução, pois este é um dos vários motivos de queima de laser. No caso de uma proteção falhar, a outra atua.

## 4.8 Conversor

### 4.9 Conversor Digital-Analógico

Neste projeto foram utilizados dois conversores digital-analógico. O primeiro, DAC1, gera a tensão de referência (set point) do estágio amplificador de erro do controle proporcional-integral (PI) da eletrônica de potência do laser, e serve como tensão de referência do controle PID do TEC do laser.

O segundo conversor, DAC0, serve para fazermos a varredura com o laser sobre a grade de Bragg e desta maneira achamos o ponto de trabalho que foi ajustado no DAC1.

O componente utilizado foi o DAC0800, que é um conversor digital-analógico de 8 bits, com saída em corrente, e alta velocidade de conversão, na ordem de 100ns. Este DAC tem flexibilidade por ter saída de corrente complementar, permitindo com isto configuração como saída diferencial ou como saída única (positiva ou negativa).

O casamento de corrente, do DAC, proporciona um erro de escala total melhor que +/- 1LSB, eliminando a necessidade de “trim”. A não linearidade causada pela temperatura é melhor que +/- 0.1% e com isto minimizando o acúmulo de erro do sistema.

A figura 4.12 ilustra a configuração do DAC como saída positiva. Este DAC foi utilizado para gerar a tensão de referência do controlador PID do TEC e a tensão de referência do controlador PI da potência do laser, como dito anteriormente.

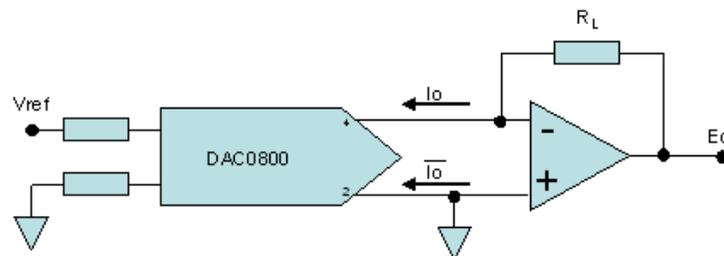


Fig. 4.12: DAC0800

A tensão de saída do DAC1, como saída positiva, é dada pela equação 4.5.

$$V_0 = \frac{V_{ref}}{R_{ref}} \cdot \frac{255}{256} \quad (4.5)$$

A configuração da figura 4.13 foi utilizada para gerar tensão simétrica e desta forma achar o ponto de operação da grade no início do firmware.

A equação 4.6 expressa o valor da tensão de saída do DAC0.

$$V_0 = V_{ref} \cdot \left( \frac{-255}{256} + \frac{2X}{256} \right) \quad (4.6)$$

onde:

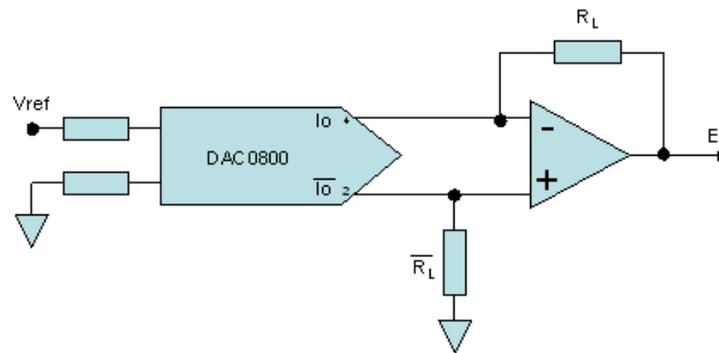


Fig. 4.13: DAC Com Saída Simétrica

X = é o código de entrada  
e  $R_L = /R_L = R_{ref}$ .

## 4.10 Conversor Analógico-Digital

O microcontrolador ATMEGA32 disponibiliza internamente de um conversor analógico-digital de 10 bits com aproximação sucessiva. Este ADC está conectado a um multiplexador de 8 canais, que são acessíveis através da porta A.

O ADC tem um circuito de *sample and hold* para certificar que a tensão medida durante a conversão seja correta. O microcontrolador dispõe de um estágio amplificador programado antes do ADC, mas como este compromete a resolução da conversão, optou-se pela não utilização do recurso.

Foi selecionada a entrada no modo *single ended*, ou seja, o conversor mede entre Vref e gnd. O ADC permite colocar uma tensão de referência (Vref) externa através do pino AREF. Para ter uma boa tensão de referência, que não varie com a temperatura, foi colocado um CI de referência de 2,5V com variação máxima de 10ppm e foi utilizado um capacitor para desacoplar o ruído.

O conversor ADC está operando em modo *single conversion*. A conversão é iniciada quando o bit ADSC é setado. Depois de terminado a conversão, o bit ADIF vai para '1' e o resultado fica em dois registros (ADCL, ADCH).

O resultado da conversão *single ended* é expressado pela equação 4.7.

$$ADC = \frac{V_{in} \cdot 1024}{V_{ref}} \quad (4.7)$$

onde:  $V_{in}$  é a tensão de entrada do canal selecionado.

A tensão de referência está sendo usado no divisor resistivo com o termistor do laser para medir a temperatura indireta do sensor com o conversor ADC de 10 bits como mostra a figura 3.5 do item 3.2 do capítulo 3. Para trabalhar em uma região que a reposta do divisor resistivo do termistor com o resistor ( $R_{th}$ ) seja o mais próximo do linear, foi escolhido o resistor de 5k11 [8].

## 4.11 Comunicação Serial - RS232

A comunicação entre os periféricos é feita através da serial, onde os bits são enviados seqüencialmente.

O byte, que é uma seqüência de 8 bits, é transmitido da seguinte forma: inicia-se a transmissão com um start bit, em seguida manda os 8 bits característicos do dado a ser transmitido e, por fim, envia um bit que indica o término da transmissão, chamado de stop bit.

A figura 4.14 ilustra a transmissão de 1 byte.

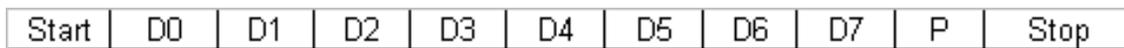


Fig. 4.14: Pacote de transmissão de 1 byte

O RS232 é um padrão elétrico para comunicação que define quais níveis de tensões representam nível lógico alto e quais representam nível lógico baixo. Como os periféricos que fazem interface com a eletrônica de controle utilizam este padrão, foi necessário fazer esta conversão de nível.

O chip MAX232 foi utilizado para fazer a conversão de nível lógico CMOS ou TTL para RS232 e vice-versa. A figura 4.15 mostra a parte responsável por esta conversão de nível.

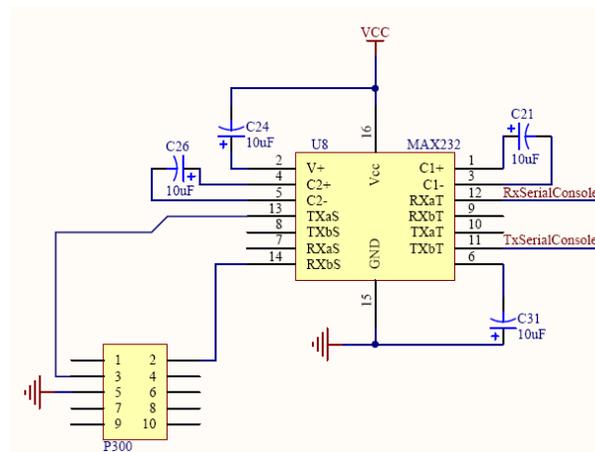


Fig. 4.15: CI MAX232

A comunicação serial configurada é assíncrona e foi ajustada em 9600 bps, sem controle de fluxo.

## 4.12 Firmware

O microcontrolador utilizado foi o ATMEGA32 do fabricante ATMEL, com core AVR de 8 bits e tem memória de programa de 32k bytes. O código foi desenvolvido em linguagem C e o compilador utilizado foi o WinAVR®.

As principais funções do código são:

- Inicialização da eletrônica, sintonizando o laser no ponto de trabalho.

- Medir o termistor.
- Calcular a temperatura do elemento sensor.
- Fazer uma filtragem digital.
- Proteger o laser, não deixando-o sair da temperatura de especificação.

Numa visão macro, o firmware está dividido basicamente em dois blocos. O primeiro bloco é responsável pelo início da sintonia do laser com a grade de Bragg e pela configuração dos registros de portas, ADC, comunicação serial do microcontrolador, etc. O segundo bloco é responsável pela medida e pela proteção do laser.

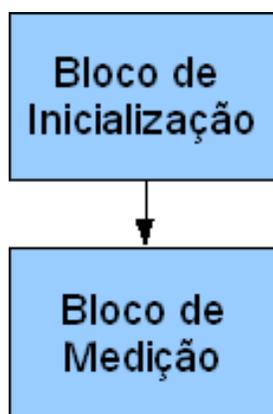


Fig. 4.16: Diagrama de bloco do firmware

A figura 4.16 mostra o diagrama de bloco do firmware e será detalhado no fluxograma da figura 4.17.

O funcionamento do firmware será explicado passo a passo a seguir.

Primeiramente é feita a configuração dos registradores de portas, ADC, comunicação serial, etc. Depois, disponibiliza 2.3V no DAC1 para a potência estabilizar e, em seguida, coloca 0V no DAC0 e fecha o relé RL1, para garantir que o laser trabalhe dentro da faixa de operação especificada.

Feito isto, espera-se o tempo do soft-start da fonte, que é de aproximadamente de 1,25 segundo. Depois da estabilização do sistema, é feita uma varredura sobre a grade de Bragg para achar o ponto de operação. Se encontrado este ponto de sintonia, espera-se 5 segundos para carregar os capacitores do PID e abre o relé RL1 para que o PID análogo controle sozinho. Caso contrário, se o ponto não é encontrado, a proteção entra em operação.

Por fim, o firmware fica em loop infinito verificando a proteção e esperando um caracter via serial RS232. No caso de chegar o caracter 't' ou 'T', o firmware lê o termistor com uma média de 500 amostragens, converte esta medida em tensão e manda para o modem GPRS via serial. Já no caso de receber de 'd' ou 'D', mede-se o valor do transimpedância DC e manda para o modem GPRS via serial. Posteriormente, o valor do termistor medido em tensão será convertido em temperatura por um software.

O Fluxograma do circuito de proteção do laser está representado na figura 4.18. Como explicado no item 4.7 "Circuito de Proteção", esta parte do firmware é responsável pela temperatura de operação

do laser. No caso da temperatura sair do especificado no data sheet, ou seja, de 15° à 35°, o que equivale a 0,636 e 1,06V respectivamente, o circuito “desliga” e coloca o laser para operar em 25°C.

## 4.13 Emuladores

Durante os testes exaustivos, alguns lasers queimaram, e devido ao seu elevado preço e por existir pouca quantidade em estoque, foi optado em desenvolver o circuito emulador do laser e da grade [3].

O esquema elétrico da figura 4.19 mostra o circuito que emula o laser, portanto foi possível testar e validar o circuito do driver do laser sem risco de queimar o laser. Já, a figura 4.20 possibilitou emular a grade de Bragg, com isto conseguindo testar a sintonia do laser no ponto de operação com a grade.

Estes dois circuitos foram importantes para validarmos o circuito como um todo, reduzindo o risco de queimar o laser que é o componente mais sensível e caro do sistema.

O circuito que emula o laser dá uma saída em corrente que representa 10% da potência óptica do laser.

Os labels de interligações dos esquemas elétricos das figuras 4.19 e 4.20 foram baseados no diagrama de bloco da figura 3.3 do capítulo 3.

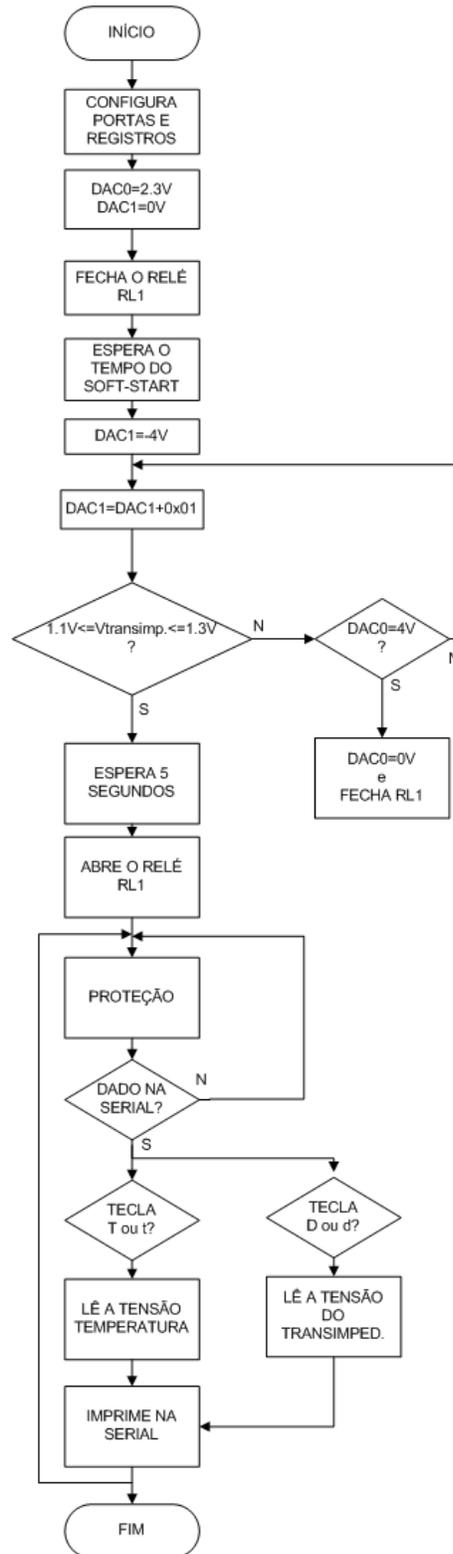


Fig. 4.17: Fluxograma do Firmware

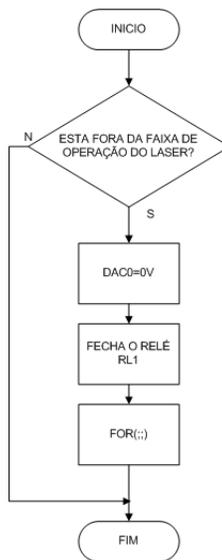


Fig. 4.18: Fluxograma da Proteção

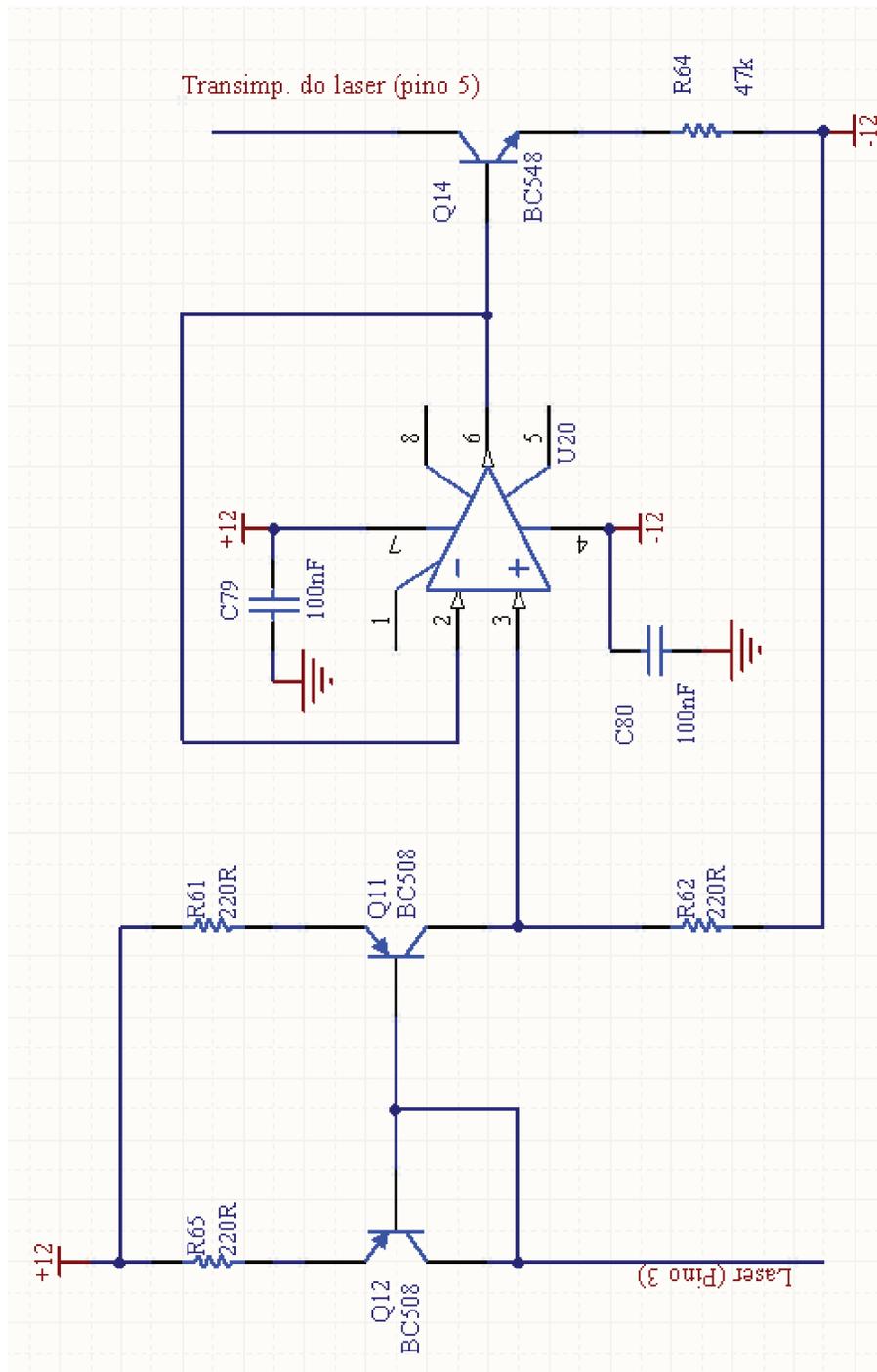


Fig. 4.19: Emulador do Laser

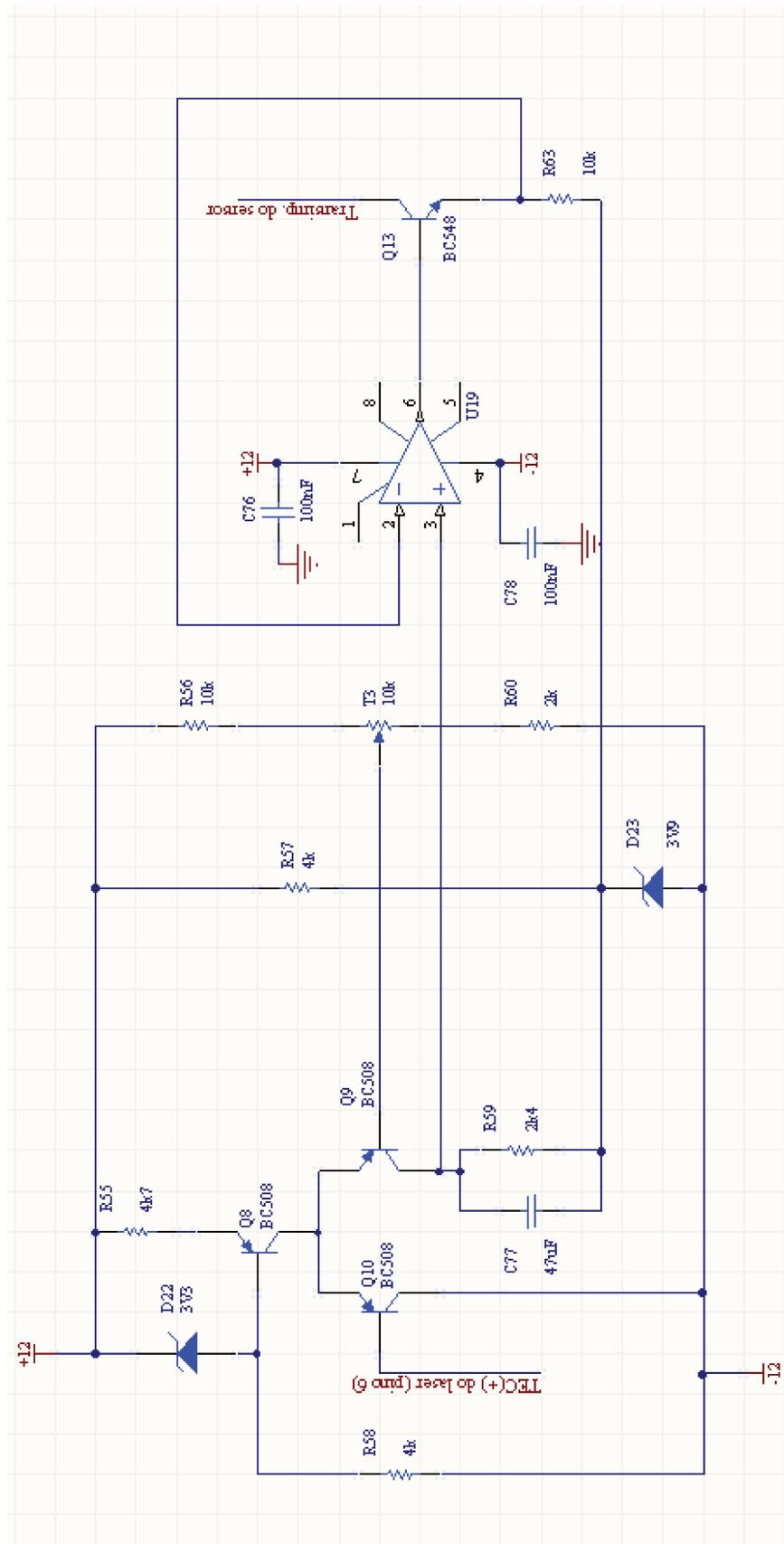


Fig. 4.20: Emulador da grade de Bragg

# Capítulo 5

## Implementação do hardware

### 5.1 Placa de Circuito Impresso

Foi utilizado o software DXP2004® para fazer o desenho do esquema elétrico e o layout da placa de circuito. Este software disponibiliza um ambiente dividido em duas partes, a primeira é usada para fazer o esquema elétrico e a segunda para fazer o layout (PCB). No esquemático são feitas todas as ligações e cria-se um banco de dados com os footprints dos componentes que serão usados. Depois disto, estes dados armazenados são exportados para o PCB e inicia-se o layout da placa. Nesta fase os componentes são distribuídos nos seus devidos lugares e faz-se a ligações elétricas. A figura 5.1 mostra o esquema elétrico e a figura 5.2 mostra o layout da placa de circuito feita no PCB do Protel2004®.

A partir de arquivos gerados no PCB foi confeccionada uma placa de circuito impresso. A figura 5.3 ilustra a placa de circuito impresso montada, que posteriormente foi acomodada numa caixa de alumínio blindada, onde esta caixa está conectada ao terra da rede.

### 5.2 Comunicação Serial

Os dados do sensor de temperatura, depois de tratados e calculados em tensão, serão enviados para um modem GPRS através da comunicação serial RS232 utilizando protocolo proprietário.

A taxa de transmissão configurada na serial é de 9600bps, sem controle de fluxo de hardware e sem paridade. A figura 5.4 ilustra o esquema de ligação elétrica do modem até o usuário. Será utilizado comunicação serial entre modem-eletrônica do sensor e entre modem-usuário.

### 5.3 Software

Para o processamento, análise e interface homem-máquina, foi feito um software em Labview®.

Este software tem a função de mandar um comando para o sistema de controle que, após recebê-lo, envia o valor da tensão do termistor via serial RS232. Depois de recebido o dado, este valor é convertido em resistência ( $R_{th}$ ) e calcula-se a temperatura através da equação característica do sensor, equação 3.9.

	Sensibilidade [nm/°C]	Faixa de Trabalho [°C]
Sensor 1	0.0088	227
Sensor 2	0.0293	68
Sensor 3	0.0597	33

Tab. 5.1: Características dos sensores

A temperatura é mostrada na tela do computador através de um display numérico e uma curva de temperatura é traçada ao longo do tempo. A figura 5.5 mostra a tela principal do software.

No sistema proposto, o valor medido é disponibilizado através da comunicação serial RS232. Portanto o software torna-se bem mais simples, podendo ser desenvolvido e adaptado ao aplicativo pelo próprio usuário.

## 5.4 Comparativo de sensores

Este item faz um comparativo entre sensores à fibra de Bragg utilizando vários tipos de transdutores térmicos.

A tabela 5.1 detalha informações relevantes dos sensores, como: sensibilidade e faixa de operação.

O sensor 1 foi montado com a fibra de Bragg sem transdutor térmico. Já no sensor 2, foi utilizado um cristal piezoelétrico como transdutor, melhorando a sensibilidade do elemento sensor.

Por fim, o sensor 3 apresentou a maior sensibilidade e o transdutor utilizado foi uma cola com o coeficiente de dilatação alto.

Para definir a escolha do sensor, precisamos considerar o ambiente de operação, faixa de operação e resolução necessária para a aplicação específica. Mas sempre lembrando que existe um compromisso entre resolução e faixa dinâmica.

## 5.5 Dificuldades Encontradas

Durante o desenvolvimento do projeto foram encontradas várias dificuldades e foram necessárias várias placas de circuito impresso.

A primeira versão tinha apenas o circuito analógico, mas como tinha muito mau contato por ser produzida através de um processo artesanal, foi feita uma segunda versão da PCI, onde os componentes ficaram distribuídos com um espaçamento maior e as trilhas com larguras maiores.

Ao ligar a eletrônica, existia uma dificuldade em sintonizar o laser com a grade, portanto foi feita uma outra placa que continha a circuito analógico, o digital, o circuito de proteção e a fonte com o soft-start.

Durante os testes exaustivos, alguns lasers queimaram, e devido ao seu elevado preço e por existir pouca quantidade em estoque, foi optado em desenvolver o circuito emulador do laser e da grade [3].

Depois de feitos os testes na nova eletrônica com o circuito emulador do laser e da grade, foi ligado o componente laser junto a eletrônica e ao sistema. E por fim, foram feitos os testes experimentais e de caracterização dos componentes que compõem o sistema



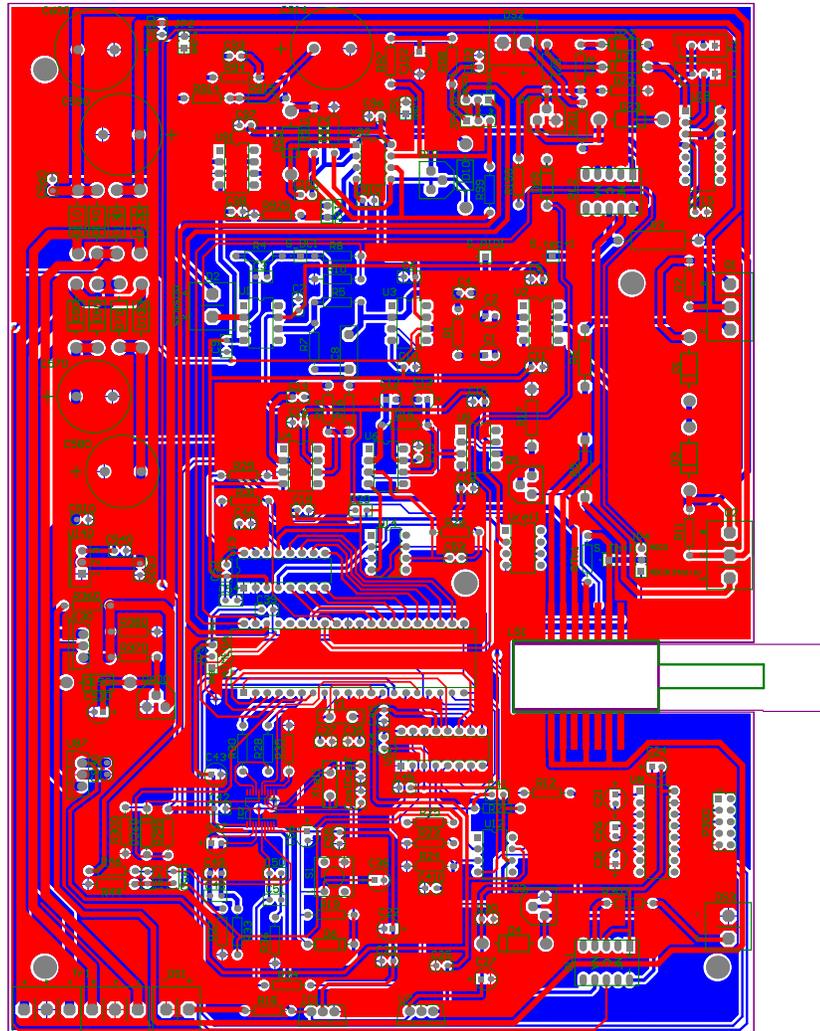


Fig. 5.2: Layout da placa de circuito impresso



Fig. 5.3: Placa de circuito impresso montada

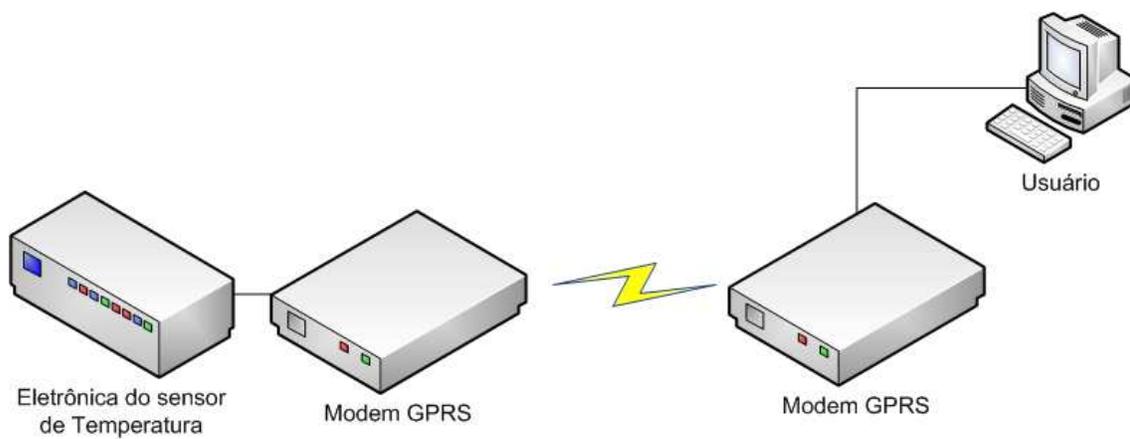


Fig. 5.4: comunicação com o usuário

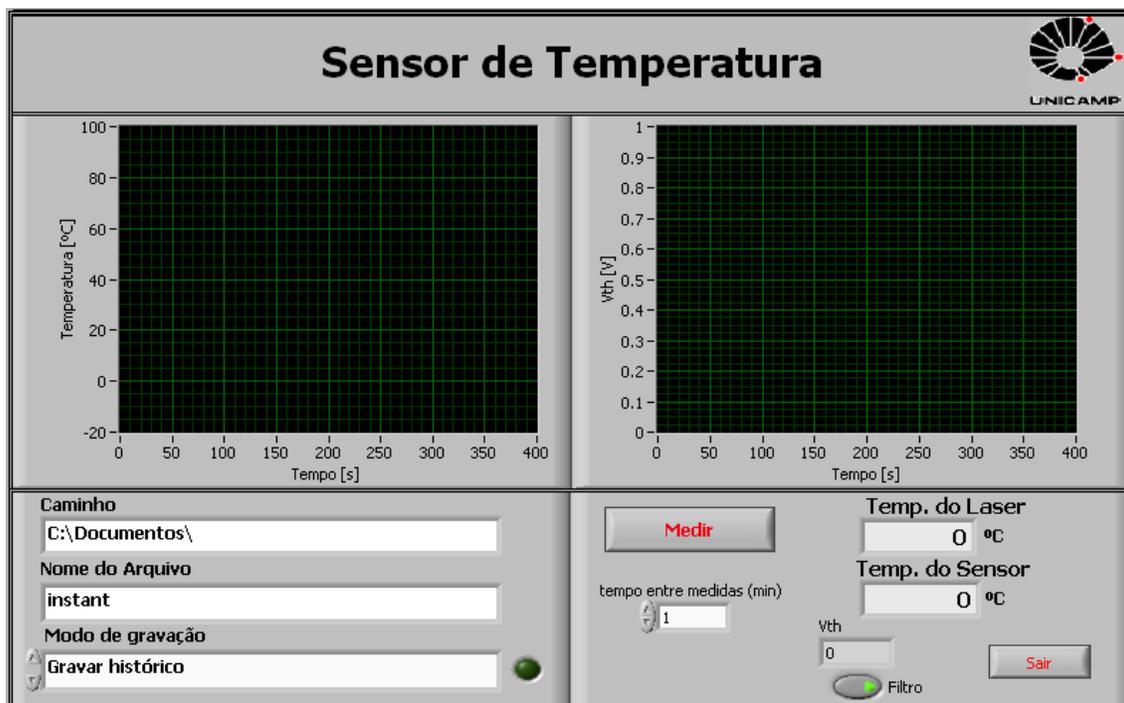


Fig. 5.5: Software para tratamento dos dados

# Capítulo 6

## Resultados Experimentais

Neste capítulo são descritos os testes realizados e seus respectivos resultados. Serão apresentados os resultados do sensor óptico proposto e sua curva de calibração. Além disto, serão apresentadas as curvas do termistor e da grade de Bragg, e por fim uma curva comparativa do sensor óptico à FBG com o termopar.

### 6.1 Ensaio na Câmara Climática

Foram feitos três ensaios térmicos, um para saber qual é a sensibilidade do elemento sensor, outro para levantar a constante  $\beta$  do termistor e por fim, um ensaio para calibrar o sensor com o sistema de medição.

### 6.2 Montagem e Ensaio no Elemento Sensor

O elemento sensor foi construído apenas com a grade de Bragg nua, sem nenhum transdutor de dilatação térmica para aumentar a sensibilidade. Foi utilizado um encapsulamento de alumínio que é o mesmo material do condutor elétrico para homogeneizar a temperatura do cabo condutor ao sensor.

A largura espectral da grade Bragg utilizada é 0.2nm e tem o lambda central em 1550.29nm. O seu perfil espectral está apresentado na figura 6.1

O sensor foi montado desta forma para conseguir uma faixa de operação grande, e mesmo assim obteve uma boa resolução.

Outra forma de montagem do sensor é colar a FBG num material sensível a temperatura, assim aumentando a resolução, mas comprometendo a faixa de operação. Como a preocupação do trabalho é faixa de operação, foi escolhida a primeira montagem citada.

Atualmente, as FBG's são feitas com compostos diferentes e fabricadas com técnicas diferentes, resultando em mudança das propriedades da FBG sensora. Para sabermos quais são as características destas novas grades, deve-se levantar a curva característica da FBG através de medidas práticas.

A figura 2.6 ilustra a configuração do ensaio realizados em laboratório para fazer a aquisição da curva  $\lambda(T)$  da figura 6.2, que mostra o resultado da caracterização do sensor de temperatura utilizando SLED. O sensor tem resposta linear e não apresenta histerese significativa entre as curvas de aquecimento e resfriamento.

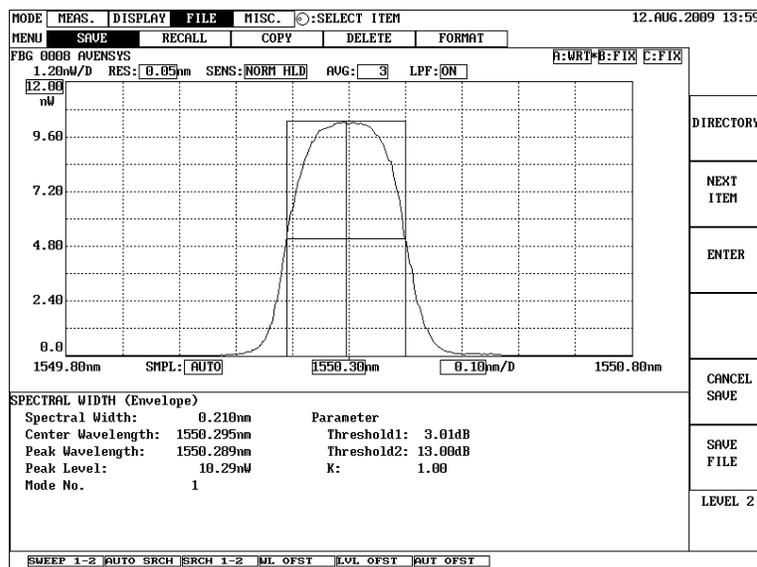


Fig. 6.1: Espectro da grade de Bragg sensora

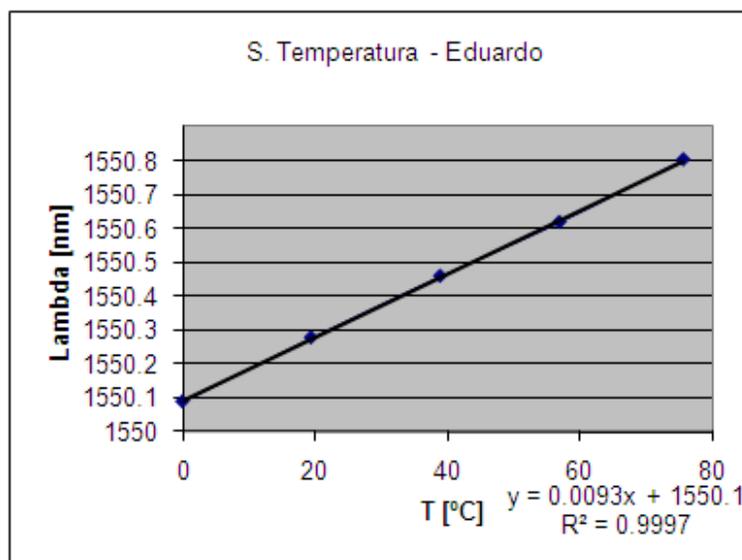


Fig. 6.2: Gráficos dos resultados das medições para caracterização do sensor de temperatura utilizando SLED.

As temperaturas obtidas no ensaio descrito acima foram feitas através de um termopar tipo J e os comprimentos de ondas foram adquiridos de um analisador de espectro óptico, do fabricante ANDO, modelo AQ6331.

A variação do lambda causado pela temperatura está ilustrada na figura 6.3, estes lambdas representam as temperaturas do sensor a -35, 20, e 80°C

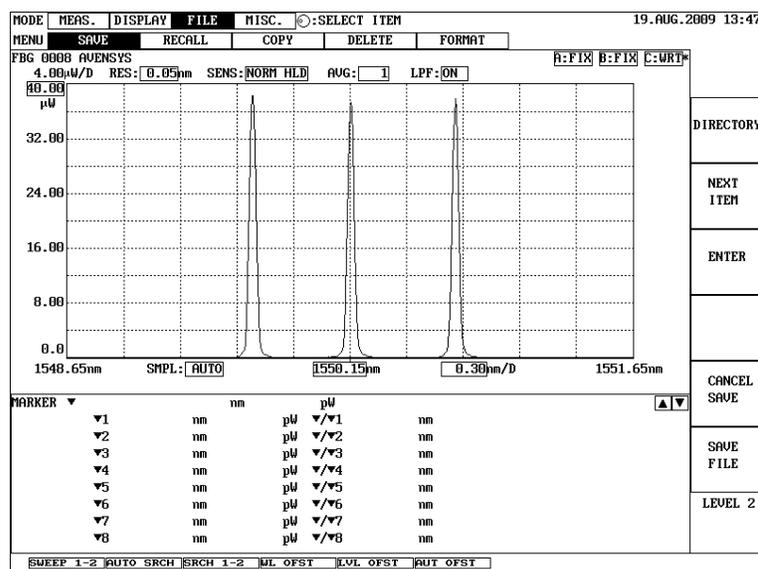


Fig. 6.3: Caracterização do sensor de temperatura a -35, 20, e 80°C.

## 6.3 Ensaio no Termistor

O termistor é o componente encapsulado internamente ao laser da Eudyna e será utilizado para medir a temperatura absoluta do sensor de modo indireto. No data sheet do fabricante, a constante  $\beta$  do termistor é de 3450 tipicamente.

Para termos certeza e precisão na medida, este valor deve ser correto. Portanto, foi realizado um experimento para medir a constante  $\beta$  do termistor.

Neste ensaio, o termistor foi colocado na câmara climática, onde houve uma variação de temperatura de 15 à 25°C (que é a temperatura de operação do laser) e foi coletado o valor da resistência do termistor em intervalos de 5°C.

Com a curva  $R(T)$  levantada, calculamos a constante  $\beta$  e garantimos que a medida de temperatura seja correta. A figura 6.4 ilustra a curva do  $R(T)$  medida.

O valor da constante do termistor calculado é 3400, sendo que no data sheet o valor fornecido é 3450. Houve uma discrepância muito pequena entre o valor medido e o fornecido, mas como queremos uma boa precisão, este dado torna-se relevante e evita o acúmulo de erro para o sistema.

## 6.4 Ensaio do Sistema de Medição

Utilizando a eletrônica de controle para medir a temperatura, foi possível traçar a curva do laser. A configuração do ensaio realizados em laboratório para fazer a aquisição das curvas 6.5 e 6.6 está ilustrada na figura 3.1.

Com os dados coletados, através do ensaio citado acima, do ensaio do Termistor e do ensaio do Elemento Sensor, extraem-se o dados necessários para calcular a temperatura do sensor utilizando a equação característica do sensor de temperatura óptico, que é a equação 3.7. Os valores das constantes que foram utilizados estão apresentandos na tabela 6.1.

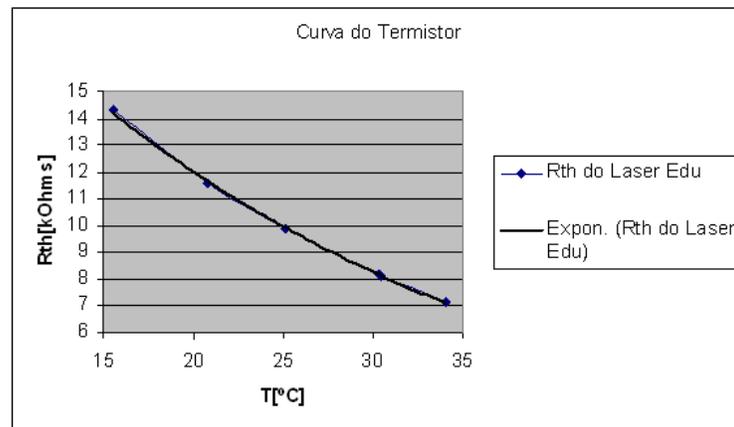


Fig. 6.4: Curva do termistor.

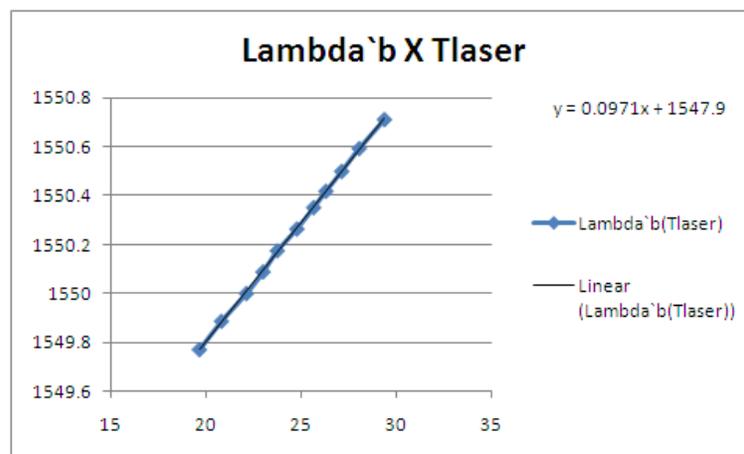


Fig. 6.5: Lambda em função da temperatura do laser.

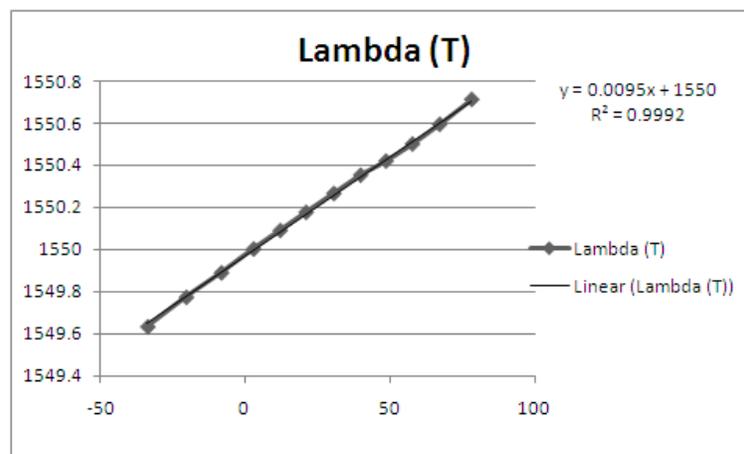


Fig. 6.6: Lambda em função da temperatura do sensor a FBG.

$\beta$	3400
$T_0$	20.8 °C
$R_0$	11570 $\Omega$
$S_{grade}$	0.0093 nm/°C
$\lambda_{0grade}$	1550.1 nm
$S_{laser}$	0.0971 nm
$\lambda_{0laser}$	1547.9 nm/°C
d	0.096 nm

Tab. 6.1: Valores das variáveis do sistema

O cálculo da constante ‘d’ é feito através da figura 6.2 e da figura 6.6.

O laser está sintonizado na derivada positiva do grade sensora como mostra a figura 6.7. O seu perfil espectral está apresentado na figura 6.1 e observa-se que a largura espectral da grade Bragg utilizada é 0.2nm tendo o lambda centrado em 1550.29.

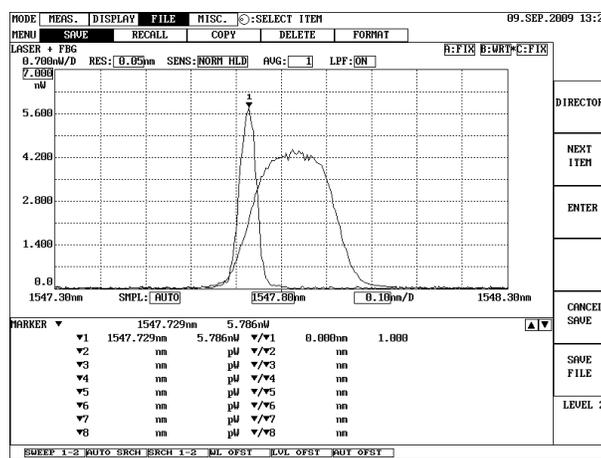


Fig. 6.7: Laser em sintonia com a grade

## 6.5 Teste em laboratório

Para validação da técnica foi realizado o teste final com o objetivo de fazer o comparativo entre o sensor óptico e o termopar. A figura 6.8 ilustra o ensaio montado junto a uma câmara climática e o diagrama do esquema de montagem da técnica proposta está ilustrado na figura 3.1.

Com os dados obtidos através deste ensaio foi possível traçar uma curva e comparar a medida do sensor óptico proposto com a medida feita pelo termopar. Assumindo que a medida prática feita pelo sistema proposto esta correta e fazendo um fitting polinomial de ordem 2 da curva medida ( $V_{th}$ ), calcula-se o erro do sistema que foi de 3.2%, como mostrado na figura 6.10.

O sistema mostrou-se bastante confiável e viável, apresentando uma variação muito pequena em relação ao sistema comparado, ou seja, ao termopar. A variação foi pequena para uma faixa de



Fig. 6.8: Ensaio na câmara climática.

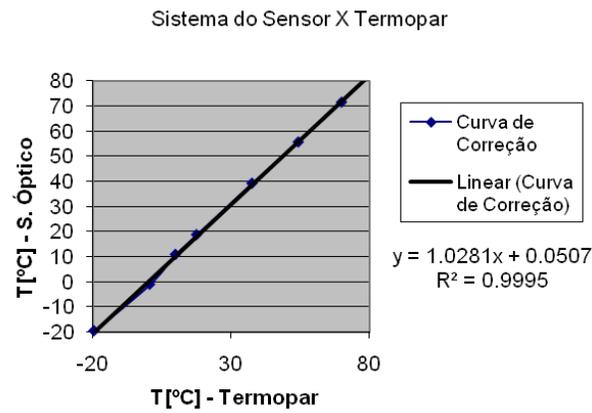


Fig. 6.9: Medida comparativa entre o sensor óptico e o termopar.

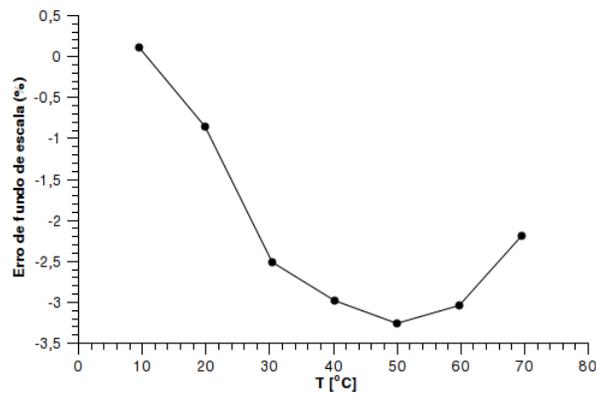


Fig. 6.10: Grafico do erro.

operação de 100°C e as medidas foram feitas por um multímetro da Fluke de 4 $\frac{1}{2}$  dígitos

O protótipo do sistema demonstrou-se eficaz e preciso para medição de temperatura. O erro de 3.2% é causado pelo erro do operador e incerteza de medição durante os ensaios.

# Capítulo 7

## Conclusões e considerações finais

Esta tese é fruto do projeto de pesquisa e desenvolvimento da Bandeirantes Energia S/A. Uma nova técnica de medição usando FBG foi demonstrada, os resultados experimentais mostraram que a técnica é viável, apresentando um erro de 3.2% na escala total que foi de 100°C.

O sistema obteve uma resolução de 0.5m°C, entretanto foi observado que o sistema pode apresentar uma resolução melhor, considerando que no layout do gnd da placa houve erro. O sensor construído, com sensibilidade térmica de 0.01nm/°C, obteve uma resolução de 5m°C.

Esta técnica para medição de sensores a FBG é simples, precisa e pode ser considerada de baixo custo, se comparada com a técnica de medição convencional que utiliza OSA- *Optical Spectrum Analyser* ou interrogador de sensores.

O laser usado neste experimento tem uma varredura em lambda muito pequena (2nm), limitando a faixa de operação do sensor em 200°C. Se usarmos outro laser disponível comercialmente, com uma variação em lambda maior (8nm), pode-se obter uma faixa de operação de até 800°C. Porém, para monitorar temperaturas elevadas, deve-se revestir a FBG com um material especial.

A utilização do laser com variação em lambda maior permite que o sistema proposto possa monitorar uma rede de sensores em linha. Outro tipo de aplicação para esta técnica é a compensação do efeito indesejável causado pela temperatura na FBG, como é o caso do sensor de tensão, que sai do ponto de trabalho quando existe variação de temperatura.

Com a aplicação deste sensor associado ao conceito de ampacidade, estima-se que haverá um aumento médio de 15% da capacidade atual das linhas de transmissão sem grandes alterações no projeto, significando uma otimização da planta existente com elevados benefícios econômicos para a concessionária e posteriormente para a sociedade [2].

# Referências Bibliográficas

- [1] L. Bjerkan - Application of fiber optic Bragg sensors in monitoring environmental loads of overhead power transmissin lines. *Appl. Optics.*, 39,#4, 554-60(2000)
- [2] Do Nascimento, C.A. M., C.A. Hortêncio, J. B. M. Ayres Neto, E. F. Costa, R. L. Leite. SOMLT - Sistema óptico de monitoramento em tempo reak de linhas aéreas de transmissão . *SNPTEE.*, 2007
- [3] Pedro Carvalho Dias. Trabalho de Iniciação Científica, *PUC-Campinas*, 2009
- [4] R. Kashyap - Fiber Bragg Gratings. *Academic Press.*(1999)
- [5] Hill and Meltz - Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview. *J. Lightwave Tech.*, 15,#8, 1263-79(1997)
- [6] Meltz,Morey,Glenn - Formation Of Bragg Gratings In Optical Fibers By A Transverse Holographic Method. *Opt. Lett.*, 14,823-25 91989.
- [7] R. L. Leite Uma contribuição ao estudo e desenvolvimento de sensores de alta tensão baseados em fibras ópticas. *Tese de Doutorado. Unicamp*, 2006.
- [8] Rafael Nova técnica para interrogação de FBG. *Tese de Mestrado. Unicamp*, 2009.
- [9] Canning, Sommer, England Fibre Gratings For High Temperature Sensor Applications. *Measurement Science ant Tech.*12,824-28 (2001).
- [10] Schmitz,Braueuer,Bryngdahd *Journ.Opt. Soc. Amer. A*12,2458-62 (1995).
- [11] Morey Distributed Fiber Grating Sensors. *17th Optical Fibre Sensors Confer. 1990 Austrália.*
- [12] Tanaka, Yoshida,Ohtska A New Type o Birefringent Fiber Fabricated For Sensor Use. *11th International Conference on Optical Fibre Sensor 1998 Japan.*
- [13] Magne et.al. State of Strain Evaluation With FBG Rosettes:Application to Discrimination Between Strain and Temperature Effects in Fiber Sensors. *Appl Opt.*36,#36 (1997).
- [14] Dong,Cruz,Reekie,Xu,Payne *IEEE Photon.Technol.Lett.* 7,1048-50 (1995)
- [15] Cordier *Appl.Phys.Lett.* 68,3069- (1996)

- [16] Fokine Underlying Mechanisms Applications and Limitations of Chemical Composition Gratings in Silica Based Fibers. *Journ.Non-Crystalline Solids* 349, 98-104 (2004).
- [17] Whuk,Méndez,Ferguson,Graver Process For Mounting And Packaging Of FBG Strain Sensors For Use In Harsh Environment Applications. *SPIE Smart Struct Conf.* 2005.
- [18] Baak Thermal Coefficient of Refractive Index of Optical Glasses. *Journ.Opt.Soc.Amer.*59,851-57 (1969).
- [19] Prodhomme A New Approach To The Thermal Change In Refractive Index Of Glasses. *Phys.Chem. Glasses* 1.119-22 (1960).
- [20] Scholze Glass,Nature,Structure and Properties. *Springer* (1991).
- [21] Zhi Zhou, OU Jinping. Techniques of temperature compensation for FBG strain sensors. *Proceeding of Asian Pascific Fundamental Problems of Opto and Microeletronics*,467-471(APCOM 2002).
- [22] Pernechele,Manari Bragg Gratings In Multimode Fiber Optics For Wavelength Calibration Of GAIA And RAVE Spectra. *ASP Conference vol.XXX* 2002.
- [23] Allison,Fox,Frogatt,Childers Novel Piezoelectric Actuators For Tuning Na Optical OBG. *Opt.Engine.*41,#10,2448-55 (2002).
- [24] Raymond Measures Structural Monitoring With Fiber Optic Technology. *1st ed. Academic Press* (2001) 1-51, 244-49, 265-74, 545-50
- [25] Popov Engineering Mechanics of Solids. *2nd Ed. Prentice Hall* (1991) pgs 70-71.
- [26] George E. Dieter and David Bacon Mechanical Metallurgy. *SI metric Edition McGraw-Hill Book Co* (1988).
- [27] Gthonos and Kalli Fiber Bragg Gratings Fundamentals and Applications In Telecommunications And Sensing. *Artech Hose* (1999).
- [28] Russell,Archambault,Reekie Fiber Gratings. *Physics World Oct*, 41-46 (1993).
- [29] Barlow and Payne The Stress Optic Effect In Optical Fibres. *IEEE J.Quantum Electr.*19,834-39 (1983).
- [30] Sirkis Unified Approach to Phase-Strain-Temperature Models for Smart Structures Interferometric Optical Fiber Sensor. *Development Opt.Eng*, 32,752-61 (1993).