



ALCINO JOSÉ BIAZON FILHO

*Nova Técnica de malha fechada para estabilização  
do ponto de operação de interrogadores de sensores  
com grade de Bragg em Fibras Ópticas*

CAMPINAS

2012



Universidade Estadual de Campinas

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Nova Técnica de malha fechada para estabilização do ponto de operação de interrogadores de sensores com grade de Bragg em Fibras Ópticas

Autor: Alcino José Biazon Filho

Orientador: Prof. Dr. José Antonio Siqueira Dias

Tese de Doutorado apresentada ao programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica, na área de concentração: Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica.

Este exemplar corresponde à versão final da Tese defendida pelo aluno Alcino José Biazon Filho e orientada pelo Prof. Dr. José Antonio Siqueira Dias.

---

Campinas

2012

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

B47a Biazon Filho, Alcino José  
Nova técnica de malha fechada para estabilização  
do ponto de operação de interrogadores de sensores  
com grade de bragg em fibras ópticas / Alcino José  
Biazon Filho. --Campinas, SP: [s.n.], 2012.

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

1. Sensor óptico. 2. Fibras ópticas. 3. Medidas e-  
létricas. 4. Detectores óticos. 5. Eletrônica - Instru-  
mento. I. Siqueira Dias, José Antonio, 1954-. II.  
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de  
Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Título em Inglês: New closed loop technique for stabilizing the operating point  
of interrogators with bragg grating sensors in optical fibers

Palavras-chave em Inglês: Optical sensors, Fiber optics, Electrical measurements,  
Optical detectors, Electronics - Instrument

Área de concentração: Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica

Titulação: Doutor em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Elnatan Chagas Ferreira, Marco Antônio Robert Alves,  
Rogério Lara Leite, Marcelo Arturo Jara Perez

Data da defesa: 08-10-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

---

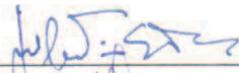
**COMISSÃO JULGADORA - TESE DE DOUTORADO**

**Candidato:** Alcino José Biazon Filho

**Data da Defesa:** 8 de outubro de 2012

**Título da Tese:** "Nova Técnica de Malha Fechada para Estabilização do Ponto de Operação de Interrogadores de Sensores com Grade de Bragg em Fibras Ópticas"

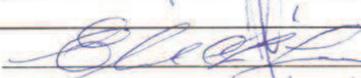
Prof. Dr. José Antonio Siqueira Dias (Presidente):



Dr. Rogério Lara Leite:



Dr. Marcelo Arturo Jara Perez:



Prof. Dr. Elnatan Chagas Ferreira:



Prof. Dr. Marco Antônio Robert Alves:



## Agradecimento

A toda minha família principalmente para a Erika pela paciência e amor.

Para minha avó Antonia, com muito amor.

Para Marina, do papai.

**Resumo:**

Sensores de fibra óptica são imunes à interferência eletromagnética (EMI), e são uma excelente escolha para ser usado em ambientes eletricamente ruidosos aplicações em sensoriamento remoto, incluindo aeroespacial, ferroviário equipamentos de segurança militar e em linhas de alta tensão. Outras vantagens incluem o fato de que eles são compactos, leves e os sinais de medição podem ser transmitidos a distâncias muito grandes (da ordem de km).

Os interrogadores convencionais para redes de Bragg (FBG) do sensor são equipamentos de custo elevado e não pode ser utilizado em aplicações de baixo custo. Neste trabalho é apresentada uma nova técnica de interrogação robusta e de baixo custo que apresenta uma boa precisão. A técnica, que utiliza um circuito de retroalimentação eletrônico para estabilizar o ponto de operação DC das grades de Bragg, permite a medição simultânea de ambos sinais AC e DC.

Um protótipo do interrogador proposto foi projetado e implementado. A técnica exige apenas três componentes ópticos: um laser distribuído, um acoplador óptico e um fotodiodo. O interrogador foi testado com sucesso em uma aplicação de DC (medição de temperatura) e uma aplicação AC (medição de corrente elétrica). Os resultados experimentais mostraram que o controle eletrônico em malha fechada pode controlar o ponto de operação da FBG com uma precisão de  $\pm 2$  ppm.

Palavras-chave: sensores ópticos, grades de fibra óptica de Bragg, Instrumentação Eletrônica, a estabilização da temperatura de redes de Bragg ponto de operação.

## Abstract

Fiber optic sensors are immune to electromagnetic interference (EMI), and are an excellent choice for being used in electrically noisy environments sensing applications, including aerospace, rail, military security equipment and in high voltage power lines. Other advantages include the fact that they are compact, lightweight and the measured signals can be transmitted at very large distances (of the order of kilometers).

The conventional interrogators for Fiber Bragg Gratings (FBG) sensor are high cost equipment and cannot be used in low cost applications. In this work it is presented a novel robust and low cost interrogation technique that presents good accuracy. The technique, which uses an electronic feedback loop to stabilize the DC operating point of the Bragg gratings, allows the simultaneous measurement of both AC and DC signals.

A prototype of the proposed interrogator was designed and implemented. The technique requires only three optical components: a Distributed Feedback Laser, an optical coupler and one photodiode. The interrogator has been successfully tested in a DC application (temperature measurement) and an AC application (electrical current measurement). Experimental results showed that the electronic feedback loop can control the operation point of the FBG with a precision of  $\pm 2$  ppm.

Keywords: Optical Sensors, Optical Fiber Bragg Gratings, Electronic Instrumentation, Temperature Stabilization of FBGs Operating Point.

## Índice

Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 - Transformadores de Potencial Óptico - TPO.	1
1.2 - Sensores Baseados em grades de Bragg.	1
1.3 - A Grade de Bragg, influência da temperatura.	3
Capítulo 2 – Técnicas de Compensação/Anulação da componente Temperatura.	7
Capítulo 3 – Nova Técnica de Interrogação em malha fechada.	24
3.1 – A Grade de Bragg (FBG).	24
3.2 – O Dispositivo Laser.	26
3.3 – Sintonia do feixe do laser na grade de Bragg (FBG).	29
Capítulo 4 – Desenvolvimento e Implementação do <i>Hardware</i> .	33
4.1 - Circuitos de Transimpedância e PID de Controle.	33
4.2 – Alimentação.	40
4.3 - Controles de Potência.	41
4.4 - Circuito de Proteção.	43
4.5 – Conversor	44

4.5.1 - Conversor Digital-Analógico.	44
4.5.2 - Conversor Analógico-Digital.	46
4.6 - Comunicação Serial - RS232.	47
4.7 - Desenvolvimento do Firmware	48
4.8 - Projeto da Placa de Circuito Impresso (PCB).	51
Capítulo 5 - Aplicações Experimentais da Técnica Desenvolvida.	53
5.1 - Sensores de Tensão.	53
5.1.1 - Teste de Campo.	54
5.1.2 - Resultados obtidos.	56
5.2 - Sensores de Corrente.	57
5.2.1 - Protótipo utilizando Fibra Óptica.	57
5.2.2 - Medidas de Resposta a Transiente.	60
5.3 - Sensores de Temperatura.	62
6.0 – Conclusões	66
7.0 - Referências Bibliográficas	68

## Lista de Figuras

Figura 1.1 - FBG de Estrutura simples	3
Figura 1.2 - Transmissão e Reflexão de sinais na FBG	4
Figura 1.3 - Variação do comprimento de onda refletida pela grade com sua deformação.	5
Figura 2.1 - Tipos de Grades de Bragg	8
Figura 2.2 - Influência da Tensão mecânica na grade de Bragg Chirped.	9
Figura 2.3 - Duas grades gravadas por processos diferentes para acentuar a influência da Temperatura.	11
Figura 2.4 - Cabeça Sensora baseada em uma única FBG em série com um Taper.	12
Figura 2.5 - Corte Transversal da Cabeça Sensora com compensação de temperatura.	13
Figura 2.6 - Comprimento de Onda pela Temperatura.	14
Figura 2.7 - Duas grades gravadas no mesmo pedaço de fibra com diferente espaçamento	15
Figura 2.8 - Cabeça Sensora do Refratômetro.	16
Figura 2.9 - Perfil Transmitido através da cabeça sensora.	16
Figura 2.10 - Controle do Laser na faixa de reflexão da FBG.	17
Figura 2.11 - Montagem de <i>Yan-Ju</i> com duas grades de Bragg	18
Figura 2.12 - Perfis das grades usadas na medida.	19

Figura 2.13 - Sensor Fabry-Perot.	20
Figura 2.14 - Sensor de tensão mecânica de uma FBG com um demodulador de FFP.	22
Figura 3.1 - Perfil de uma grade de Bragg.	25
Figura 3.2 - Montagem Óptica da Técnica proposta.	26
Figura 3.3 - Diagrama de Blocos do Sistema.	28
Figura 3.4 - Rampa de subida ampliada.	30
Figura 3.5 - Mudança de ganho no perfil da FBG.	32
Figura 4.1 - Sinal de entrada do Fotodiodo.	33
Figura 4.2 – Esquemático dos amplificadores de Transimpedância e Fotodiodo.	35
Figura 4.3 - Resposta em frequência do circuito Transimpedância AC.	36
Figura 4.4 - Saída do Amplificador de Transimpedância AC.	37
Figura 4.5 - Dispositivo Laser dessintonizado da FBG.	38
Figura 4.6 – Controlador PID analógico, gerador de corrente e proteção usados para estabilizar o ponto de operação da FBG.	39
Figura 4.7 - Controle de Potência.	42
Figura 4.8 - Circuito de Proteção.	43
Figura 4.9 – DAC0800.	45

Figura 4.10 – DAC com saída simétrica.	46
Figura 4.11 - Fluxograma da Proteção.	49
Figura 4.12 - Fluxograma do <i>Firmware</i> .	50
Figura 4.13 - Layout da Placa de Circuito Impresso.	51
Figura 4.14 - Foto do Interrogador Desenvolvido.	52
Figura 5.1 - Corte Transversal do Sensor de Tensão.	53
Figura 5.2 - Unidade sensora instalada na rede de treinamento de 13,8kV na EDP Bandeirante.	55
Figura 5.3 - Vista interna da unidade optoeletrônica.	55
Figura 5.4 - Tensão medida pelo TPO no período das 18h30min do dia 12/02/10 às 02h30min do dia 13/02/10.	56
Figura 5.5 - Fotos do Sensor de Corrente.	57
Figura 5.6 - Tensão de Saída RMS em função da corrente.	58
Figura 5.7 - Erro da medida de Corrente.	59
Figura 5.8 - Dependência da Temperatura.	60
Figura 5.9 - Resposta a transiente do Transdutor de Corrente.	61
Figura 5.10- Variação do Comprimento de Onda com a Temperatura.	62
Figura 5.11 – Diagrama de Blocos destacando a linearização do Termistor.	63

Figura 5.12 - Divisor Resistivo para Linearizar a curva do Termistor.

64

## Lista de Tabelas

Tabela 4.1 - Variáveis do Controlador PID.	40
Tabela 4.2 - Variáveis do Controlador PI.	42

## **1 CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO**

### **1.1 – TRANSFORMADORES DE POTENCIAL ÓPTICO - TPO**

O Transformador de Potencial Óptico é um equipamento capaz de medir tensões em um sistema elétrico utilizando componentes ópticos como fibras ópticas, grades de Bragg, fontes de luz de banda larga, filtros que utilizem diferentes características físicas da luz, lasers entre outros.

Esses novos componentes (TPOs) devem possuir características que sejam semelhantes em desempenho ao que se encontra no mercado ou ter um custo competitivo, considerando-se as vantagens que um sistema que já possui um canal de comunicações em fibras ópticas pode oferecer para aplicações no setor elétrico.

Instalações em sistemas elétricos com o intuito de medir as grandezas desejadas e, por conseguinte, controlá-las possuem um custo muito elevado, uma subestação custa da ordem de milhões de reais. Para um sistema de distribuição de energia em uma cidade (com padrão de 13,8 kV) seria muito interessante um controle/medição distribuído por toda a malha ou pelo menos em partes críticas do circuito, permitindo identificar e isolar rapidamente as falhas ocorridas.

### **1.2 - SENSORES BASEADOS EM GRADES DE BRAGG**

A opção mais interessante para se efetuar tal conjunto de tarefas seriam as fibras ópticas, onde vemos que um sinal pode ser transmitido por vários quilômetros sem a necessidade de um reforço ou a recuperação do sinal, viabilizando assim uma espécie de sistema supervisor mais barato e confiável na malha de distribuição de energia de uma cidade. Várias propriedades das fibras ópticas podem ser aproveitadas para a construção de sensores, existem diferentes tecnologias que são utilizadas e estudadas com este fim, como por exemplo: grade de Bragg, interferô-

metro, espalhamento, rotação Faraday, filtro Fabry-Perot, refletômetro óptico no domínio do tempo (BOTDR) entre outras. Entre todas elas a que recebe maior atenção e a que nos interessa por ser o objeto de estudo desta tese é a que utiliza a grade de Bragg em fibra óptica (FBG).

Os sensores a fibra óptica são ideais para condições ambientais severas onde podemos observar uma alta interferência, alta vibração, ambiente muito quente, com umidade, explosivos, corrosivos e outros mais.

Devido suas pequenas dimensões, uma fibra óptica pode ser instalada com precisão em pequenas áreas ou lugares de difícil acesso. Dentre os sensores baseados em fibra óptica mais estudados encontramos sensores de deformação, temperatura, pressão, sonoro, corrente e tensão elétrica, rotação, vibração, aceleração, flexão, torsão e deslocamento. Observamos também que os sensores de deformação mecânica recebem maior atenção dentro das pesquisas científicas, onde se destacam os sensores baseados em grade de Bragg (FBG).

Os sensores a fibra óptica são imunes a interferências eletromagnéticas (EMI), e podem ser utilizados sem problemas em ambientes eletricamente ruidosos, como em linhas de transmissão de alta tensão.

Outra característica interessante é que possuem vantagens sobre os transdutores de corrente ou tensão convencionais: alta isolamento elétrica, medida passiva, maior largura de banda, alta sensibilidade, facilidade de transportar informação através da luz usada para excitar o sensor, são compactos, leves e imunes a ambientes explosivos, sendo fáceis de integrar a sistemas digitais.

Sensores ópticos utilizando FBG são muito mais simples e apresentam-se como uma excelente alternativa referente a baixo preço. A maioria dos sensores a FBG são baseados no mesmo princípio, medir a variação do comprimento de onda quando se estimula a FBG através da vibração mecânica, temos aqui que destacar que a grande tarefa no caso desses sensores seria a separação da componente (strain) tensão mecânica da componente da temperatura, os sensores desenvolvidos se utilizam de outros elementos além da grade de Bragg que são sensíveis àquelas grandezas medidas. Para o sensor de tensão que será apresentado neste trabalho temos um cristal piezoelétrico, que é sensível a campos elétricos, colado na FBG e que transmite a oscilação senoidal do campo elétrico. Para o caso do sensor de corrente foi usado um núcleo de Terfenol-D que possui a propriedade de magnetostrição para oscilar conforme o campo magnético atravessa a bobina desse material [2] [20].

### 1.3 - A GRADE DE BRAGG, INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA

A figura 1.1 mostra um segmento de fibra óptica com uma grade de Bragg, com período espacial  $\Lambda$  ao longo do eixo do núcleo da fibra.

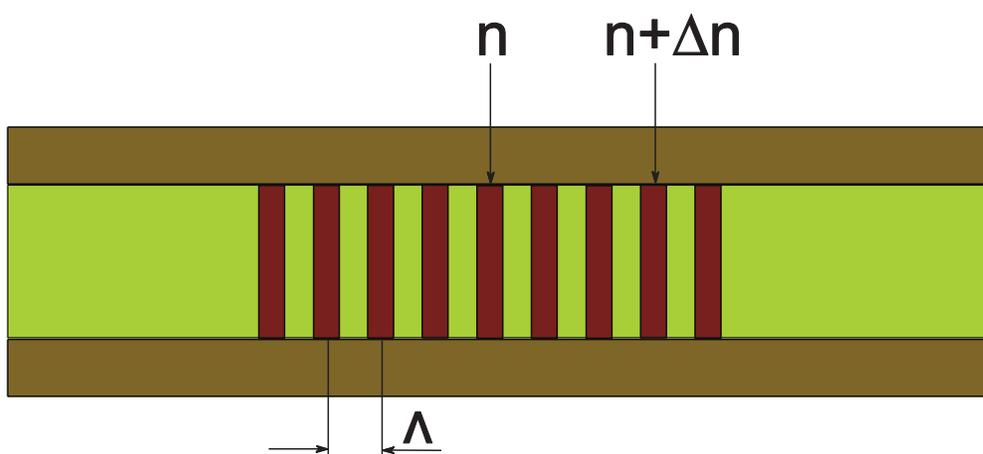


Figura 1.1 - FBG de Estrutura simples

Podemos observar na figura 1.2 que aplicando-se um sinal de luz de espectro largo em uma FBG, esta refletirá um determinado comprimento de onda de luz,  $\lambda$ , transmitindo todos os demais comprimentos de onda.

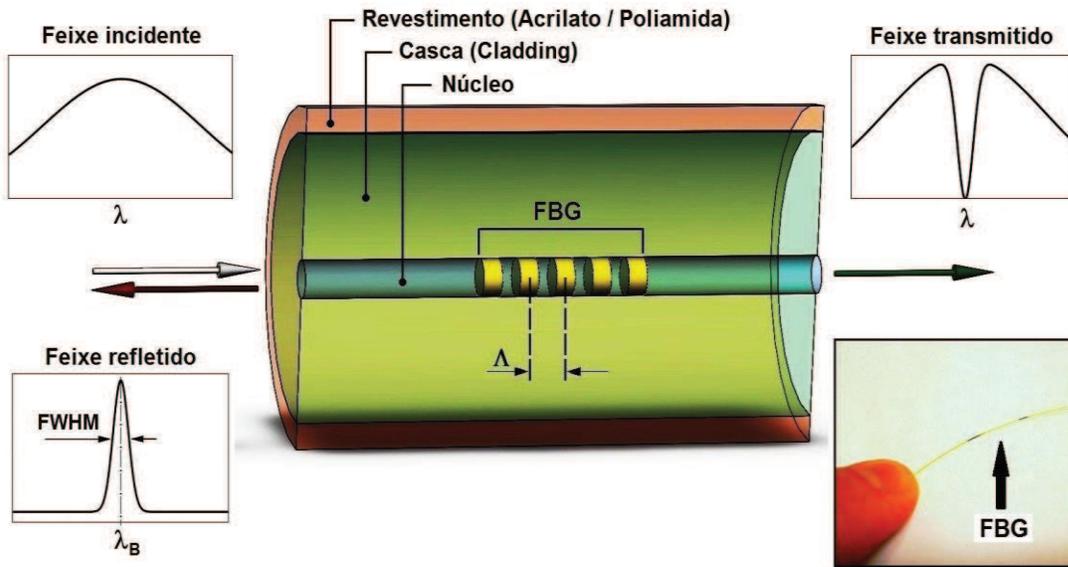


Figura 1.2 - Transmissão e Reflexão de sinais na FBG

O segundo comportamento que é importante é a variação do comprimento de onda refletido conforme ocorrem deformações da grade de Bragg (FBG), e que será utilizado neste. Vemos na figura 1.3 a seguir um quadro que ilustra este comportamento [19].

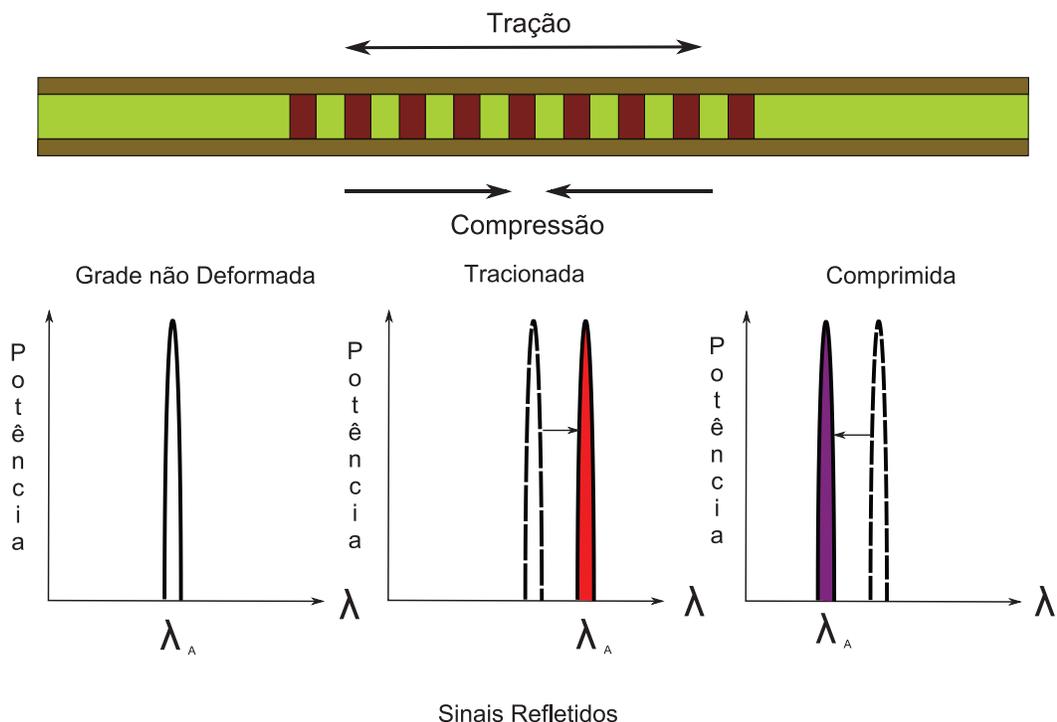


Figura 1.3 - Variação do comprimento de onda refletida pela grade com sua deformação.

Temos que ressaltar que essa deformação tem duas fontes principais, a deformação provocada pelos sensores desenvolvidos (deformação mecânica) e a deformação indesejada pela alteração da temperatura ambiente onde esta grade está instalada e que precisa ser anulada.

É possível desenvolver um equacionamento [3] para se demonstrar a separação entre a tensão mecânica (*strain*) e a influência da temperatura em uma grade de Bragg, segue abaixo que o comprimento de onda central  $\lambda_B$  de uma FBG é dado pela equação (1):

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1)$$

Onde  $n_{eff}$  é o índice de refração efetivo do núcleo da fibra,  $\Lambda$  é o espaçamento periódico da grade de Bragg. A frequência de ressonância da grade de Bragg, cujo período corresponde ao comprimento de onda central da luz refletida da FBG, depende do índice de refração do núcleo da fibra e da periodicidade da grade. Esse índice de refração efetivo, tal como o espa-

çamento periódico entre os planos gravados na grade, como já foi mencionado são afetados pelas mudanças na tensão mecânica e na temperatura.

Usando a equação (1), a alteração do comprimento de onda na grade de Bragg devido a mudanças na tensão mecânica e na temperatura é dado por:

$$\Delta\lambda_B = 2 \left( \Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T + 2 \left( \Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial l} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) \Delta l \quad (2)$$

O primeiro termo na equação (2) representa o efeito da temperatura na fibra óptica. Uma variação no comprimento de onda da grade de Bragg devido à expansão térmica muda o espaçamento da grade e o índice de refração. Esta variação do comprimento de onda devido uma mudança de temperatura pode ser escrito como:

$$\Delta\lambda_T = (\alpha_f + \xi) \Delta T \lambda_B \quad (3)$$

Onde  $\Delta\lambda_T$  é a variação do comprimento de onda da grade de Bragg devido a mudanças na temperatura. Temos também os componentes:

$$\alpha_f = \left( \frac{1}{\Lambda} \right) \left( \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \quad \text{Coeficiente de expansão térmica para a fibra óptica (4)}$$

$$\xi = \left( \frac{1}{n_{eff}} \right) \left( \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \right) \quad \text{Coeficiente termo-óptico (5)}$$

Usando os valores encontrados para a sílica levemente dopada com germânio encontrada no núcleo das fibras ópticas temos:

$$\alpha_f = 0,55 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \quad \text{e} \quad \xi = 7,0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$$

Vemos assim que o maior responsável pela variação do comprimento de onda em uma grade de Bragg é o coeficiente Termo-óptico da equação (5).

## 2 CAPÍTULO – TÉCNICAS DE COMPENSAÇÃO/ANULAÇÃO DA COMPONENTE TEMPERATURA

As descrições e análises a seguir mostram várias tentativas de separação das componentes da temperatura e da tensão mecânica em sistemas baseados em grades de Bragg. Vemos nas publicações uma clara divisão entre tentativas de se alterar as FBG's como, por exemplo, a alteração de características ou dimensões ou a gravação de várias grades na mesma fibra, e uma parte dos esforços voltados para a utilização de sistemas ópticos com circuitos eletrônicos com o intuito de se anular ou separar a influência indesejada da temperatura na medida. [3]

A grade de Bragg *Chirped* é uma técnica de gravação que como se pode observar na figura 2.1 gera uma grade que não é uniformemente gravada, possuindo um aumento gradual no espaçamento das interferências  $\Lambda$ , isto é usado para alargar o espectro refletido e retirar ou diminuir a influência das harmônicas ou os chamados lóbulos laterais no sinal refletido, também se pode destacar que o formato da reflexão fica mais próximo de uma curva gaussiana.

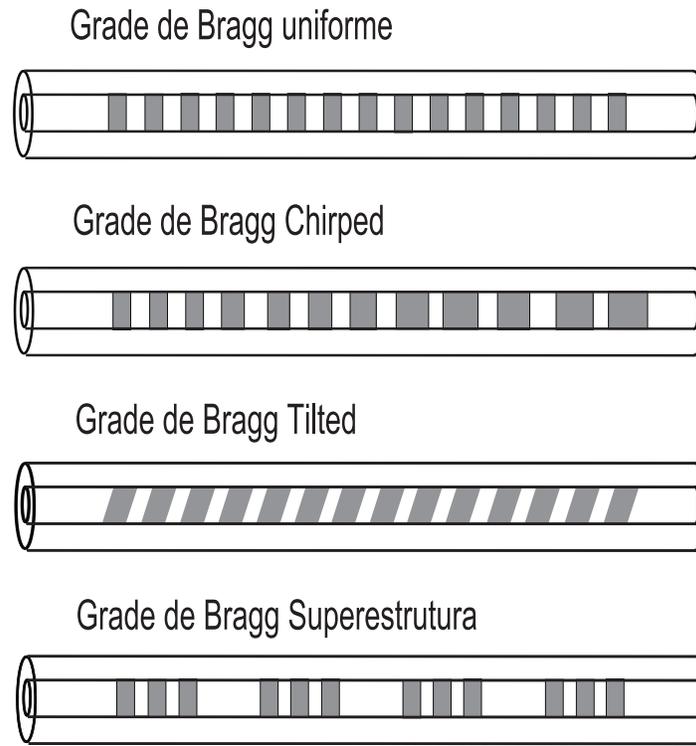


Figura 2.1 - Tipos de Grades de Bragg

A técnica descrita na publicação consiste em reduzir o diâmetro da fibra no local da gravação da grade de Bragg com o intuito do perfil da grade modificar-se conforme ocorrem alterações na tensão mecânica aplicada, observa-se que ainda existe o componente devido à temperatura, porém muito minimizado. Xu [4] mostra que assim é possível através de circuitos eletrônicos obterem-se com alguma precisão somente a tensão mecânica aplicada nesta grade, como mostra a figura 2.2.

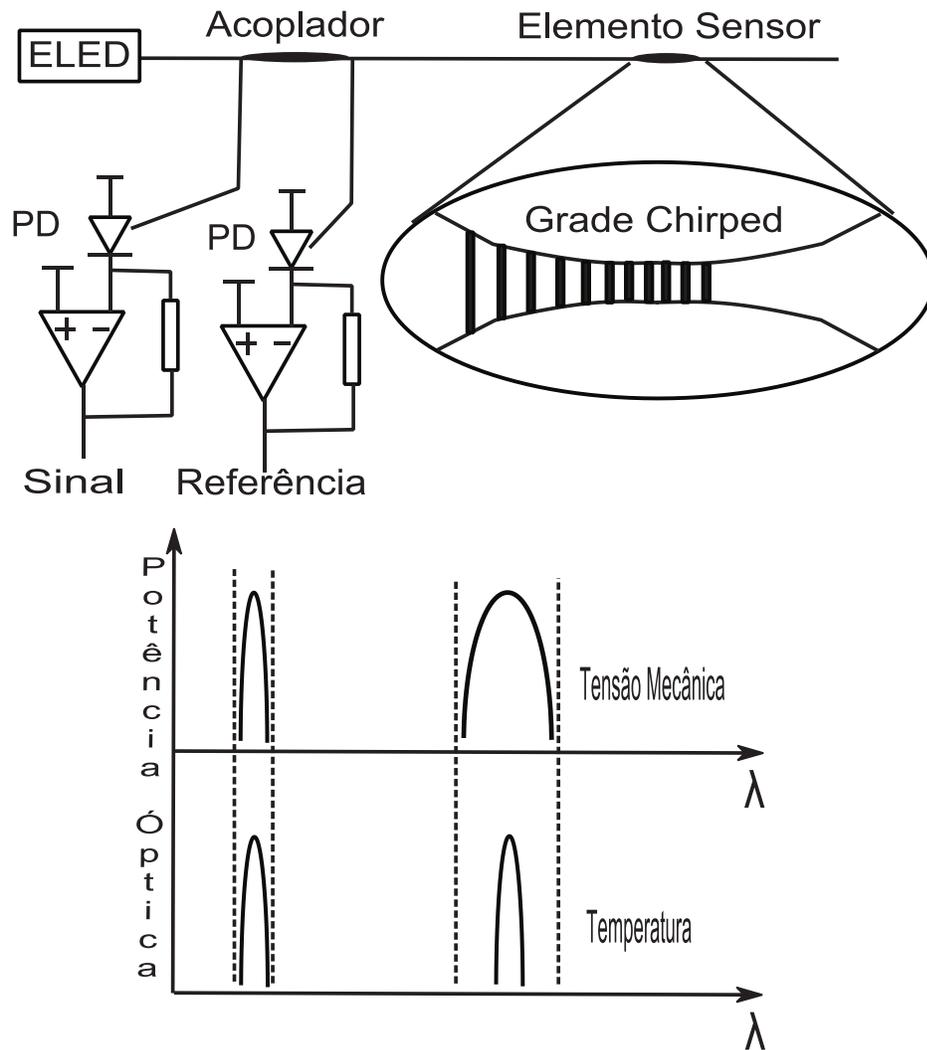


Figura 2.2 - Influência da Tensão mecânica na grade de Bragg Chirped.

O comprimento de onda central altera-se nessa cabeça sensora, porém fica muito evidente cada uma das componentes. Há que destacar que o perfil dessa grade alarga-se com uma tensão mecânica e quando observa-se uma alteração de  $\lambda_B$  devido à temperatura isso não ocorre, observando-se apenas uma alteração do comprimento de onda central.

Em *Shu et all* [5] descreve-se uma tentativa de compensação da temperatura criando duas grades muito próximas com as mesmas dimensões, duas grades de 7mm de comprimento espaçadas de 1 mm uma da outra grade, a grande diferença neste processo é que cada fibra recebeu duas grades de tipos diferentes. Para esta pesquisa o autor usou 4 tipos de grades combinando-as duas a duas, grade do tipo I construída na presença de hidrogênio, o mesmo tipo I sem hidrogênio, IA e IIA, cada uma dessas grades possuem procedimentos diferenciados durante o processo de sua fabricação, alterando a forma como cada uma delas responde às variações de temperatura ambiente.

Essa alteração da sensibilidade na temperatura é justamente a característica procurada pelos autores, quanto mais acentuada essa diferença mais notável será a componente da temperatura, assim quando efetuarmos uma medida do sinal transmitido pode-se observar que existem dois vales correspondentes aos  $\lambda$ s das grades inscritas na fibra, tal como descrito na figura 2.3. Quando fizermos uma sequência de medidas aumentando a temperatura poderemos observar que esses vales se distanciam, no gráfico de comprimento de onda por temperatura teremos duas retas com diferentes inclinações. Através deste procedimento conseguimos extrair parâmetros para o equacionamento que possibilita a separação das componentes temperatura e tensão mecânica.

Aqui há a necessidade de se extrair os parâmetros da onda transmitida com um equipamento equivalente ao OSA [6] e efetuarmos cálculos para determinarmos cada um dos componentes (temperatura e tensão).

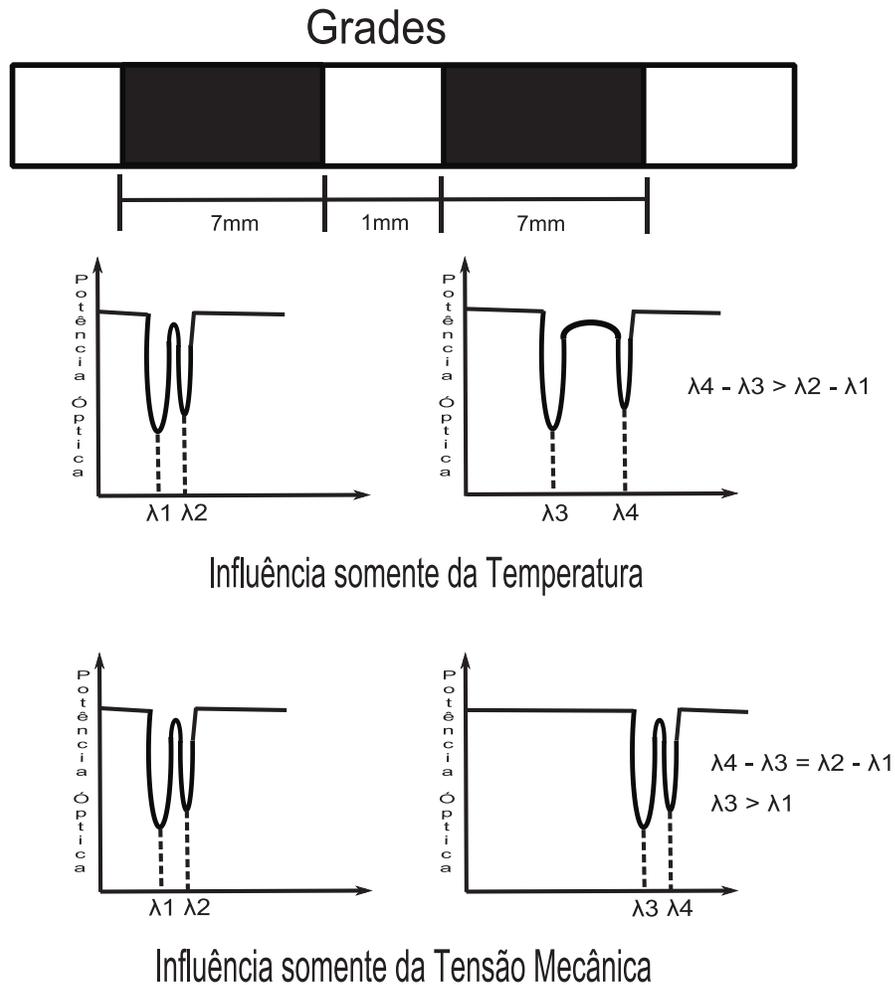


Figura 2.3 - Duas grades gravadas por processos diferentes para acentuar a influência da Temperatura.

Podemos observar que vários autores tentam criar novas configurações para que a tensão mecânica fique mais evidente ou que ocorra a diminuição em sua sensibilidade. *Frazão et all* [7] mostram em sua publicação uma tentativa de controlar a sensibilidade da cabeça sensora criando estreitamentos na fibra próximos da região onde a grade de Bragg está gravada.

A seguir na figura 2.4 apresenta-se uma cabeça sensora construída na fibra:

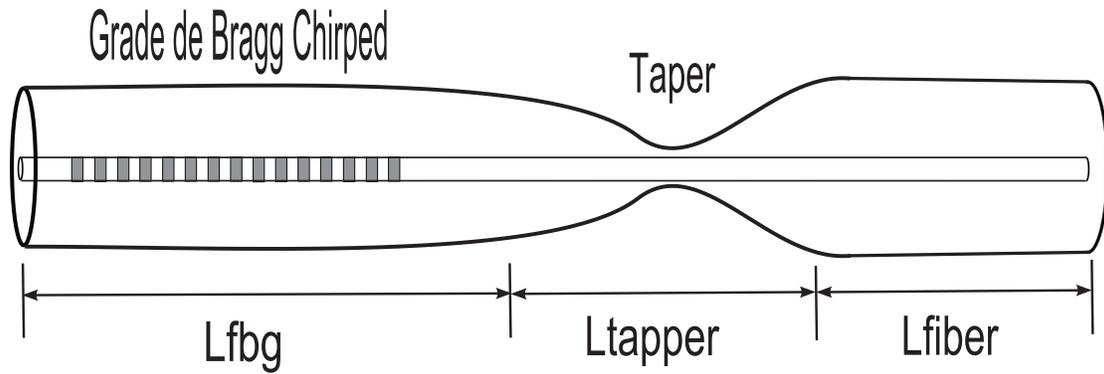


Figura 2.4 - Cabeça Sensora baseada em uma única FBG em série com um Taper.

O chamado “Taper” é um estreitamento gradual no diâmetro da fibra criado através de uma tração imposta durante descargas elétricas controladas para alongar e estreitar o trecho desejado da fibra, chegando-se assim a um diâmetro desejado.

Através do equacionamento vemos que é possível obter o deslocamento desejado no comprimento de onda alterando somente as características dessa cabeça sensora em função da tensão mecânica aplicada  $\varepsilon$ . Para apenas um estreitamento mostramos a equação final que está desenvolvida no trabalho de *frazão et all*, assim temos:

$$\Delta\lambda_{FBG} = k_{\varepsilon}(FBG) \frac{L_{FBG} + L_{taper} + L_{fiber}}{L_{FBG} + L_{taper} \left(\frac{d_{FBG}}{d_{taper}}\right)^2 + L_{fiber}} \varepsilon \quad (6)$$

Onde:

$d_{FBG}$  - é o diâmetro da fibra onde a grade está inscrita.

$d_{taper}$  - é o diâmetro conseguido com esse estreitamento.

$k_{\varepsilon}(FBG)$  - constante dependente do diâmetro e material da fibra.

$\varepsilon$  - tensão mecânica aplicada na fibra.

O procedimento desenvolvido possui grandes imprecisões necessitando ainda de um analisador óptico de espectro para efetuar a leitura do perfil dessa nova grade. Deixa apenas evidente a componente da tensão mecânica, mas precisa de cálculos complexos e uma caracterização sofisticada dos parâmetros da grade para descontar a componente da temperatura.

Neste trabalho de *Du Yanliang et all* [3] vemos a construção de outra cabeça sensora com 3 materiais diferentes como mostrado na figura 2.5 abaixo.

Para que essa montagem cumpra seu propósito é necessário usar um material de coeficiente de expansão térmica (CET) negativo que é o material 1 na figura, esses materiais são compostos de tal forma que possam eliminar totalmente ou reduzir significativamente a componente da temperatura sobre a grade, transferindo somente a informação da tensão mecânica desejada.

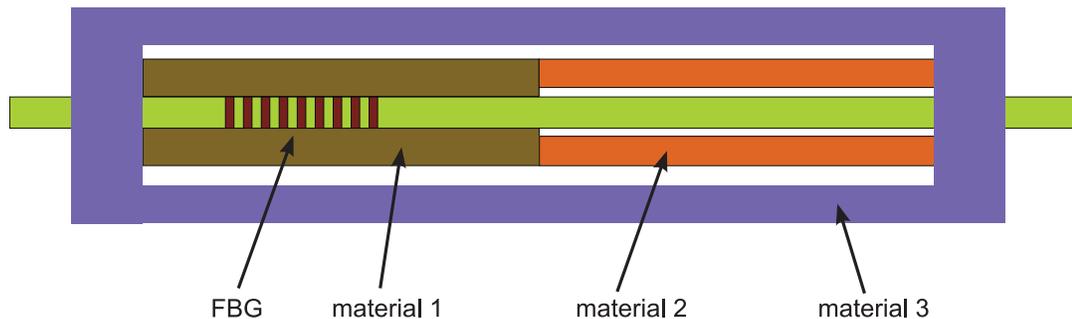


Figura 2.5 - Corte Transversal da Cabeça Sensora com compensação de temperatura.

Vemos o resultado dessa cabeça sensora na figura 2.6, comprimento de onda versus temperatura, onde existe uma comparação entre a reta medida para a fibra nua com uma grande inclinação e a reta da cabeça sensora quase horizontal com o aumento da temperatura. A téc-

nica não foi capaz de eliminar totalmente a influência da temperatura necessitando de um maior esforço em pesquisa para complementar esse ajuste.

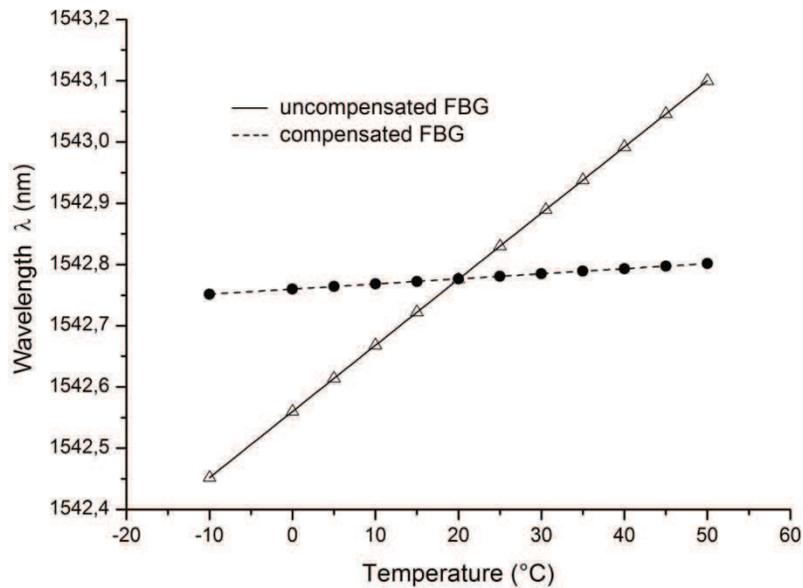


Figura 2.6 - Comprimento de Onda pela Temperatura.

Nesta secção descreve-se uma nova técnica de grade de Bragg, onde duas grades assimétricas são gravadas simultaneamente no mesmo pedaço da fibra óptica assim temos dois vales na componente transmitida na região de 1310nm e 1550nm [8]. O método usado para gravá-las usa um laser infravermelho de femtosegundo, que é um laser que opera com pulsos da ordem de  $10^{-15}$  do segundo, faz com que a grade assim produzida possa aguentar altas temperaturas, da ordem de 800  $^{\circ}\text{C}$  (normalmente uma grade de Bragg aguenta temperaturas da ordem de somente 300  $^{\circ}\text{C}$ , acima disso ocorre a perda da gravação).

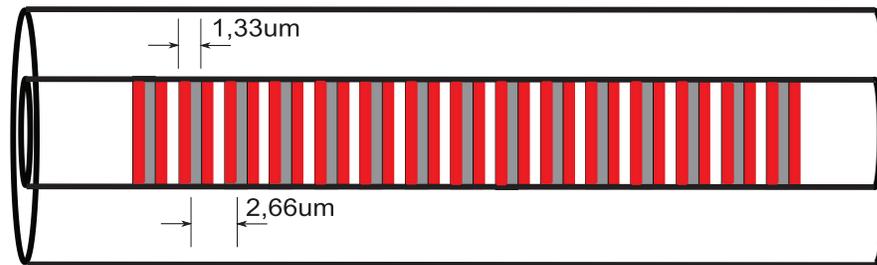


Figura 2.7 - Duas grades gravadas no mesmo pedaço de fibra com diferentes espaçamentos.

A publicação de *Yong Zhu et all* [8] mostra a técnica inovadora de gravação que possibilita atingir tais níveis de temperaturas e usa uma técnica com duas grades na mesma fibra para uma tentativa de separação de efeitos (tensão mecânica pela temperatura)

Com os dados dos comprimentos de onda medidos na temperatura ambiente pode-se através de um OSA obter-se o perfil transmitido por essa fibra e assim calcular as componentes da Tensão mecânica e da temperatura sobre tal fibra, existindo ainda a dependência da utilização de um equipamento caro para a extração dos parâmetros das grades.

A proposta de *Rong et all.* [9], apresenta um refratômetro baseado inteiramente em fibra óptica, que se calibra através da temperatura, uma estrutura em modo SMS (single-multi-single) com FBG, que é o elemento que fornece esta referência de temperatura para a medida do índice de refração.

A figura 2.8 mostra detalhes da construção da cabeça sensora, a parte central do sensor é uma fibra que sofreu um desgaste controlado para que se pudesse atingir a faixa desejada de sensoriamento e a FBG, a estrutura representada na esquerda da figura fornece a referência de temperatura no sinal transmitido pelo conjunto.

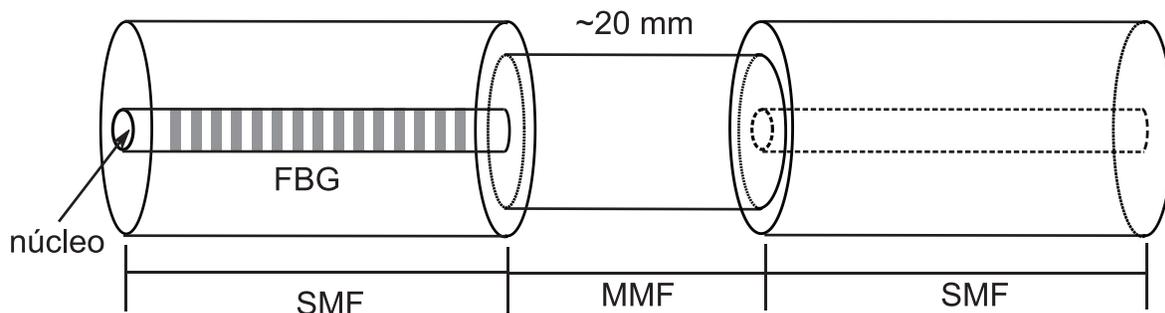


Figura 2.8 - Cabeça Sensora do Refratômetro.

SMF – Single Mode Fiber

MMF – Midle Multi Mode Fiber

A componente que é transmitida possui um vale, como na figura 2.9, que é extremamente sensível a mudanças do índice de refração do meio onde a fibra está inserida, a combinação entre a FBG e a estrutura da SMS é uma tentativa de se estabilizar o conjunto para que a medida de refração possua pouca variação.

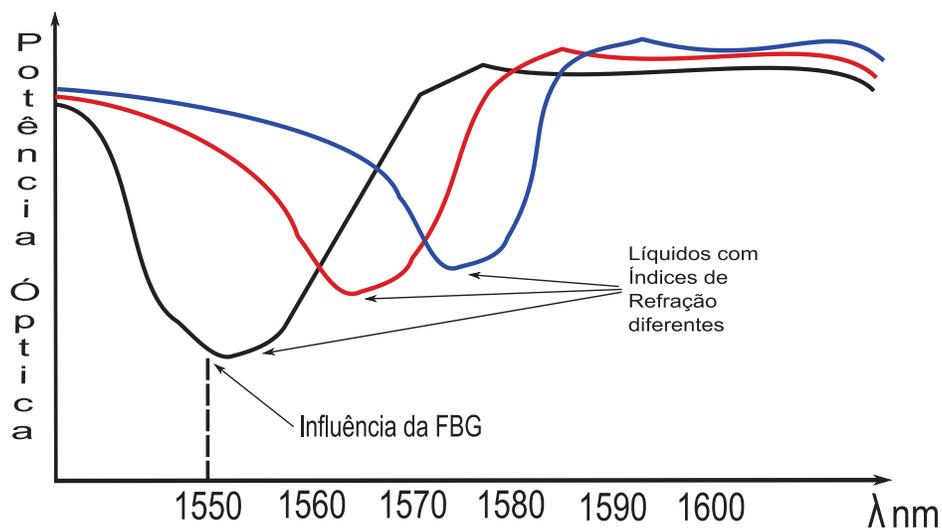


Figura 2.9 - Perfil Transmitido através da cabeça sensora.

A medida final é efetuada por um OSA mostrando onde se situa o comprimento de onda refletido pelo experimento, podemos montar um gráfico que mostra para cada solução o seu índice de refração de acordo com o comprimento de onda.

Um dos primeiros passos na direção de um sistema em malha fechada foi dado por *Lissak et all* [10], mostrado na figura 2.10 vemos uma montagem alternativa que usa um fonte luminosa de banda estreita ajustável e uma única grade de Bragg para medir a tensão mecânica aplicada. O circuito óptico possui dois acopladores ópticos para fornecer os sinais de referência a serem estabilizados (do Laser em relação ao sinal refletido pela grade de Bragg), tais sinais chegam a fotodiodos que são comparados e um erro é enviado ao controle que efetua correções na frequência fornecida pela fonte de luz.

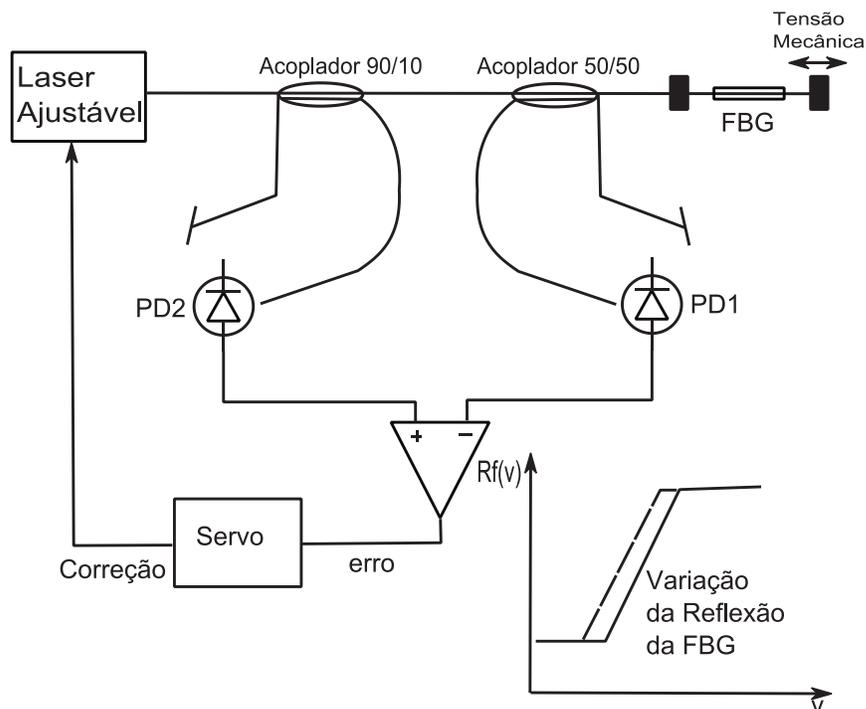


Figura 2.10 - Controle do Laser na faixa de reflexão da FBG.

Aqui se utilizaram dois fotodiodos e dois acopladores ópticos para possibilitar a comparação do sinal gerado no laser com o sinal refletido da FBG, em nosso projeto toda essa parte óptica é feita por circuitos eletrônicos capazes de gerar uma referência do correto posicionamento da reflexão da FBG e efetuar a separação entre as componentes DC e AC do sinal da FBG.

*Yan-Ju Chiang et all* [11] conseguem medir a tensão mecânica retirando a componente da temperatura usando 2 grades de Bragg com espectros de reflexão iguais ou muito próximos entre si, temos que destacar que a sensibilidade térmica de ambas as grades devem ser iguais. Tal experiência representa-se na figura 2.11, nela unicamente uma dessas grades estará sob a influência da tensão mecânica, enquanto ambas serão instaladas muito próximas para que suas temperaturas ( $T_1$  e  $T_2$ ) sejam iguais.

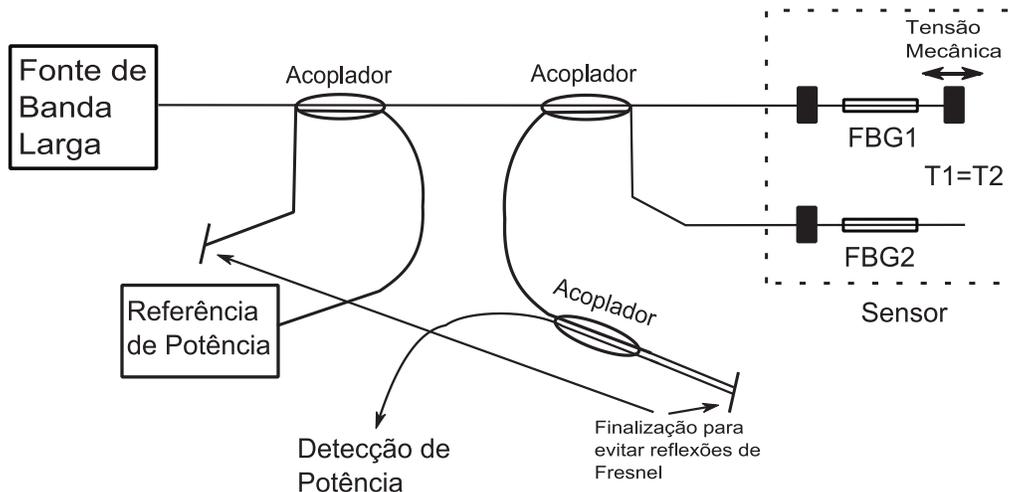


Figura 2.11 - Montagem de *Yan-Ju* [11] com duas grades de Bragg

Reflexões de Fresnel são as reflexões que ocorrem quando a luz atravessa de um meio para outro com índices diferentes de refração.

Para explicar o princípio de operação da montagem de *Yan-Ju*, nos assumimos que os espectros de reflexão das FBG's sejam idênticos, tanto o formato como o comprimento da onda central.

Quando uma luz de banda larga chega a FBG1 somente o seu perfil de reflexão retorna e é encaminhada para a FBG2 que tem o mesmo comportamento, refletindo somente o comprimento de onda resultante das duas reflexões.

Caso não exista tensão mecânica na grade de medida, o perfil óptico das duas grades continua igual e inalterado, com uma tensão vemos que esse perfil diminui porque as grades se distanciam e refletem cada vez menos comprimentos de onda, tal como é representado na figura 2.12.

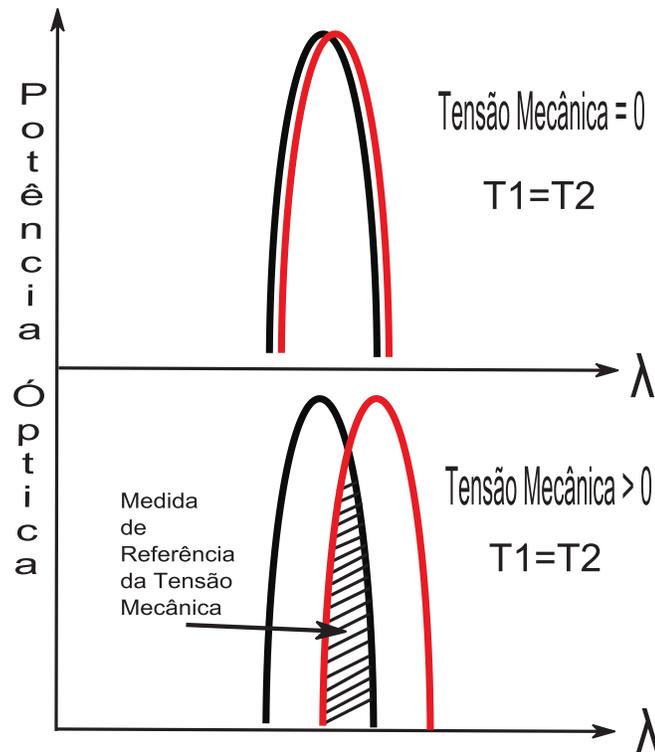


Figura 2.12 - Perfis das grades usadas na medida.

Essas duas reflexões são medidas em um medidor de potência óptica, tal como um equipamento *Q82216 Advantest* [12], que devidamente calibrado pode nos fornecer o valor de tensão mecânica aplicado na fibra sensora.

O trabalho de *Kersey et al.* [13] apresenta para uma única FBG um sistema com uma fonte de luz de banda larga que é injetada no sistema, a componente refletida na FBG é desviada por um acoplador até um FFP (filtro Fabry-Perot) ajustável com uma largura de banda próxima a da FBG. Este filtro tem um faixa de espectro livre maior que o comprimento de onda operacional da grade de Bragg escolhida (tipicamente  $\pm 5\text{nm}$ )

Existem estruturas mais simples para o sensor interferométrico Fabry-Perot [1] extrínseco, tal como o representado na figura 2.13, onde existe uma configuração com a cabeça sensora mostrada no detalhe.

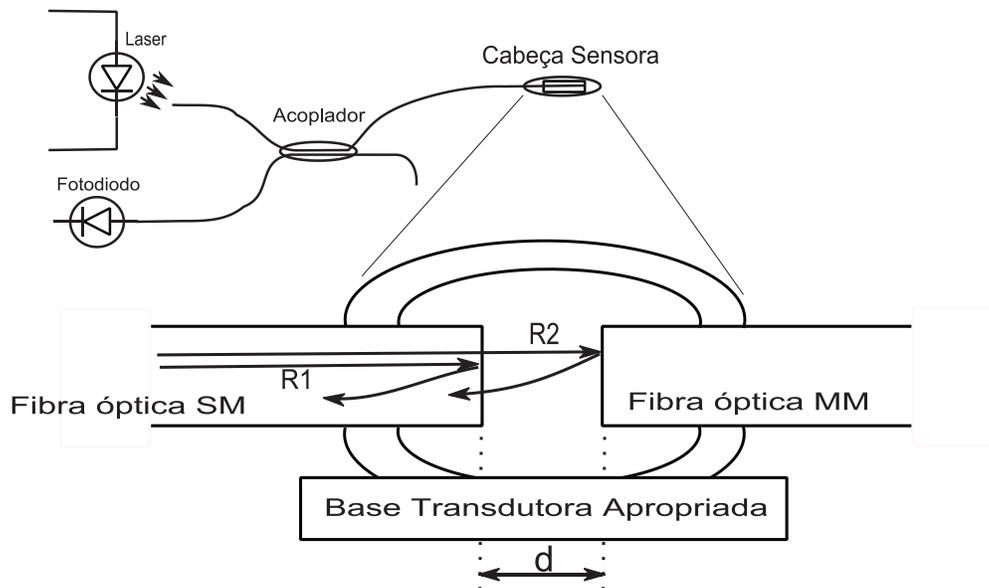


Figura 2.13 - Sensor Fabry-Perot.

A cabeça é composta de duas fibras ópticas de faces planas e nuas, em que a reflexão de Fresnel é de aproximadamente de 4% resultado das duas interfaces, uma sílica/ar e a outra ar/sílica, definindo uma cavidade.

A primeira reflexão R1 é chamada de 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 e a intensidade luminosa I no detector varia em função do tamanho da cavidade “d”:

$$I = I_0 \cos\left(\frac{4pd}{\lambda}\right) \quad (7)$$

Onde  $I_0$  é o valor máximo da intensidade de saída e  $\lambda$  é o comprimento de onda central da fonte de luz.

A base transdutora apropriada é a parte responsável pela conversão das grandezas físicas desejadas (pressão, temperatura, tensão mecânica, campo elétrico, campo magnético, etc.) em deslocamento (variação da cavidade “d” na figura 2.13).

Um sensor ou filtro com essas características também sofre a influência da temperatura na base transdutora transmitindo esta influência para a medida do comprimento de onda.

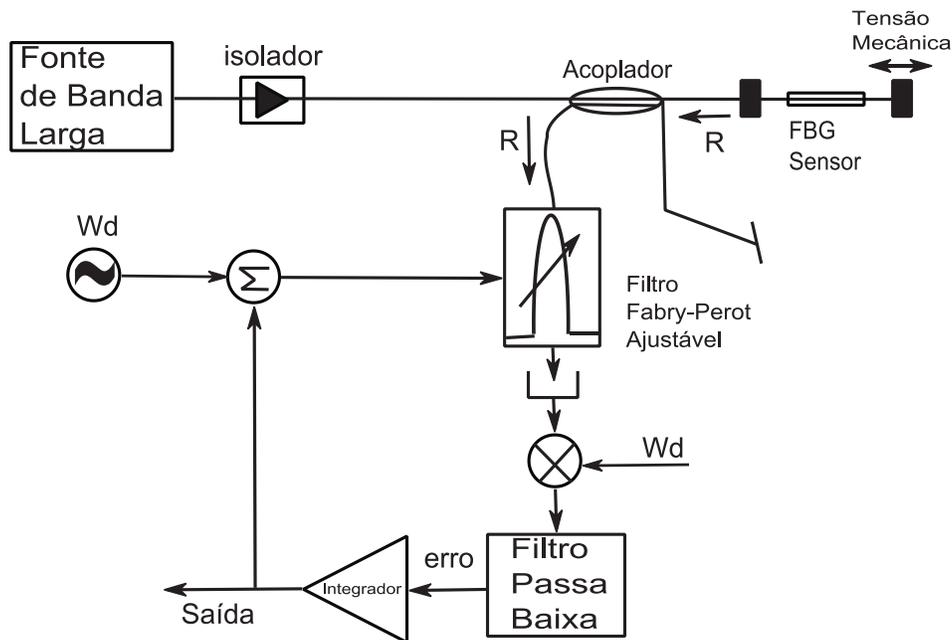


Figura 2.14 - Sensor de tensão mecânica de uma FBG com um demodulador de FFP.

No sistema desenvolvido por *kersey et all* [13] representado na figura 2.14, o perfil estreito do filtro FFP é travado (sintonizado) no perfil da reflexão “R” da FBG em um arranjo de malha fechada. Para que isto seja possível o comprimento de onda transmitido pelo filtro FFP é modulado com uma frequência  $f_d$ , isto resulta em uma modulação da saída óptica do filtro FFP, que em geral possui componentes fundamentais e as harmônicas de  $f_d$ . Quando o comprimento de onda do sinal refletido pela FBG e o pico da transmissão do FFP estão alinhados a amplitude da fundamental é nula realimentando isto no FFP, este está sintonizado no comprimento de onda retornado pela FBG.

A amplitude da componente fundamental da modulação serve como erro do sistema através de um circuito integrador que é realimentado para os elementos de sintonização do Filtro Fabry-Perot em FBG para se travar no comprimento de onda do sensor da grade de Bragg.

Aqui podemos observar uma montagem simples, que possui somente uma FBG, um circulador óptico e fonte de luz, sendo que o restante pode ser considerado o interrogador de *Kersey*. Não houve uma análise por parte dos autores da influência da temperatura no sinal gera-

do, supomos que esse sistema em malha fechada possa compensar a influência da temperatura porque sempre busca alinhar-se com o comprimento de onda refletido pela FBG. Durante a redação deste trabalho foi feita uma cotação do valor de um filtro como este e obtive-se um valor superior a US\$ 10,000.00, valor este que torna a solução demasiadamente cara.

### 3 CAPÍTULO – NOVA TÉCNICA DE INTERROGAÇÃO EM MALHA FECHADA

#### 3.1 – A GRADE DE BRAGG (FBG).

Foi visto no capítulo anterior que uma técnica para interrogação de sensores a grade de Bragg deve ser capaz de separar eficazmente as componentes da tensão mecânica da componente da variação de temperatura. Neste capítulo apresentamos uma nova técnica de interrogação em malha fechada que permite realizar a interrogação AC de um sensor com FBG em torno de um ponto de operação, eliminando totalmente os erros causados pela variação de temperatura na FBG.

Na figura 3.1 temos o perfil de uma grade de Bragg Chirped, vemos que ela não possui os lóbulos laterais ou as componentes harmônicas, pois estas poderiam causar problemas no momento de sintonizar o feixe de laser (esta sintonia será discutida no item 3.3). A relação entre potência óptica e comprimentos de onda observada foi extraída por meio de um OSA (*Optical Spectrum Analyser*)[6], equipamento que foi usado durante todo o projeto como um medidor do que estávamos obtendo na geração do sinal pelo dispositivo laser ou no momento da sintonia do feixe de laser na grade de Bragg.

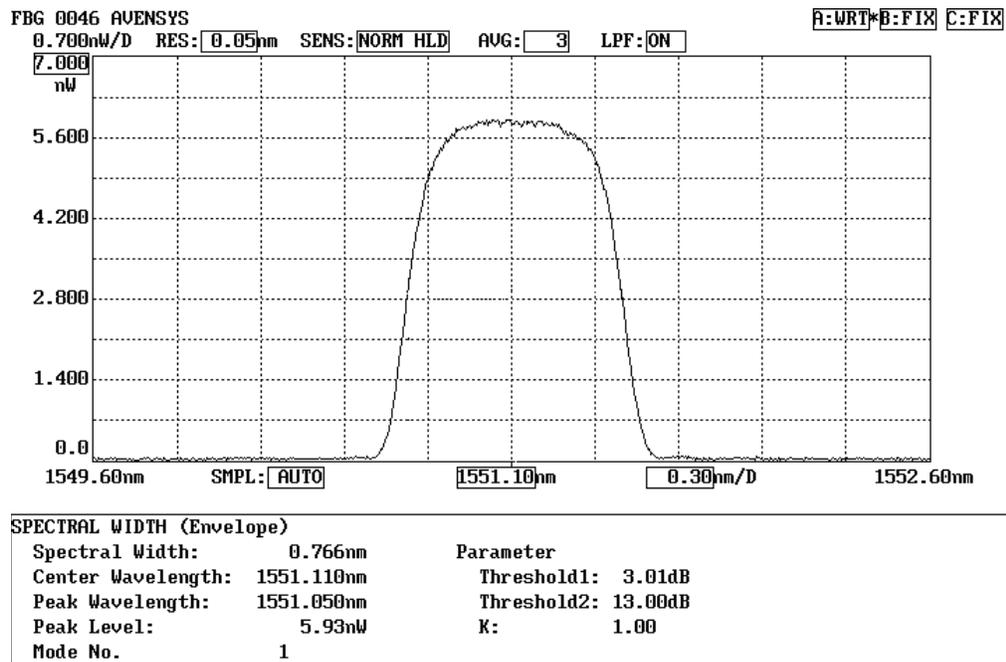


Figura 3.1 - Perfil de uma grade de Bragg.

A FBG em questão está centrada no comprimento de onda de 1551,10 nm, neste caso na temperatura ambiente de 25°C. Este valor central altera-se conforme a grade de Bragg é submetida a uma tensão mecânica ou a uma variação da temperatura. Temos que destacar que somente os comprimentos de onda refletidos pela grade se alteram, sendo que o perfil como foi mostrado pelo OSA não se altera com essas variações de tensão mecânica e temperatura, e isto é um fato importante que será usado na construção do interrogador.

A rampa de subida como a de descida da FBG são muito próximas de retas possuindo somente uma curvatura nas extremidades e com uma declividade que pode ser aproveitada para a estabilização de um sinal, precisamos somente definir que pontos das rampas seriam pontos eficientes de operação. Conforme formos descrevendo o interrogador a escolha do ponto de operação ficará mais clara. Temos que destacar que para nossas grades a largura das rampas é de aproximadamente 0,3 nm, sendo que este valor pode ser escolhido ao encomendar-se uma grade ao fornecedor.

### 3.2 – O DISPOSITIVO LASER.

Conforme descrito em *kersey et al.* [13], pretendemos usar a luz refletida da FBG para recebermos a informação desejada, porém nossa fonte de luz não é proveniente de um fonte de banda larga, mas de um feixe laser sintonizável de banda estreita. Na figura 3.2 vemos a montagem óptica do nosso sistema de sensoriamento, incluindo o laser e seus componentes internos.

O dispositivo Laser utilizado ao longo deste trabalho é um modelo FLD5F6CX-E34, fabricado pela Eudyna [14], muito utilizado em sistemas de comunicação e é desenvolvido para otimizar sistemas de transmissão de modulação direta para DWDM (Dense wavelength-division multiplexing), que é a multiplexação densa por divisão de comprimento de onda, é um protocolo geralmente utilizado em redes de fibra óptica. Este dispositivo permite que numa rede se utilizem sinais ópticos com diferentes tipos de frequência (comprimento de onda) no mesmo canal através da multiplexagem.

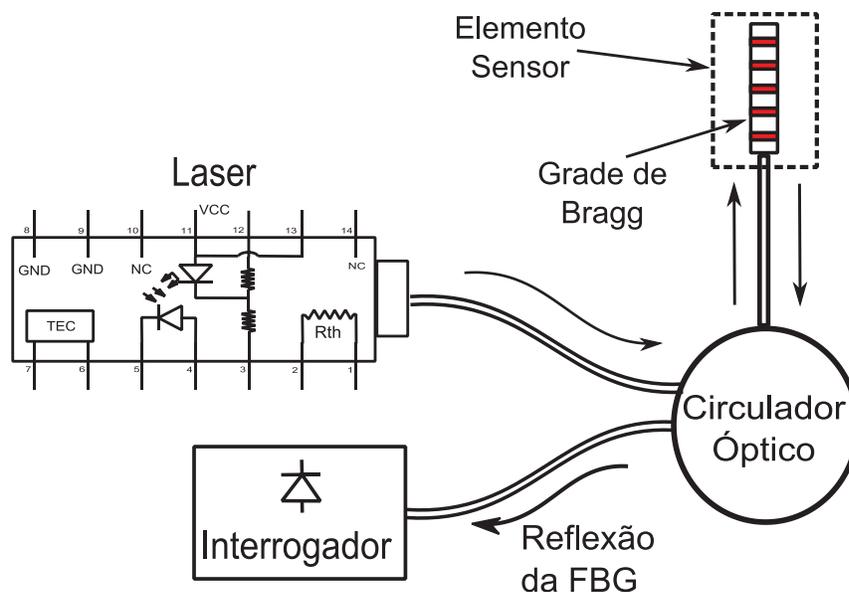


Figura 3.2 - Montagem Óptica da Técnica proposta.

O sistema da figura 3.2 acima é considerado uma malha fechada porque o interrogador controla as funções do dispositivo *laser* gerando o sinal a ser injetado no circulador óptico para a grade de Bragg no comprimento de onda desejado e usa a informação que retorna do sensor para corrigir qualquer desvio de sua operação padrão. Três elementos se destacam no dispositivo laser, o TEC, o fotodiodo de referência e o termistor, que estão representados com os diagramas de blocos na figura 3.3 [14].

O TEC, elemento que está nos pinos 6 e 7 do nosso modelo de dispositivo laser (descrito na figura 3.2), é um componente interno usado para controlar o comprimento de onda gerado pelo dispositivo *laser*, é a abreviação de Thermo Electric Cooler, e este componente é baseado no Efeito Peltier [15], que é a produção de um gradiente de temperatura em duas junções de dois semicondutores de materiais diferentes quando submetidos a uma corrente elétrica em um circuito. Com a utilização deste efeito, é possível esquentar ou esfriar a parte interna do dispositivo laser, que tem seu comprimento de onda central alterado seguindo essa variação da temperatura interna do dispositivo, possibilitando assim sintonizarmos a grade de Bragg.

O fotodiodo de referência, elemento que está nos pinos 4 e 5, figura 3.2, é usado para medir a potência óptica que está sendo produzida no laser. O FLD5F6CX pode gerar uma potência óptica de até 5mW. Para os propósitos do projeto foi decidido usar 1mW, pois este é o valor mínimo necessário para termos uma reflexão estável.

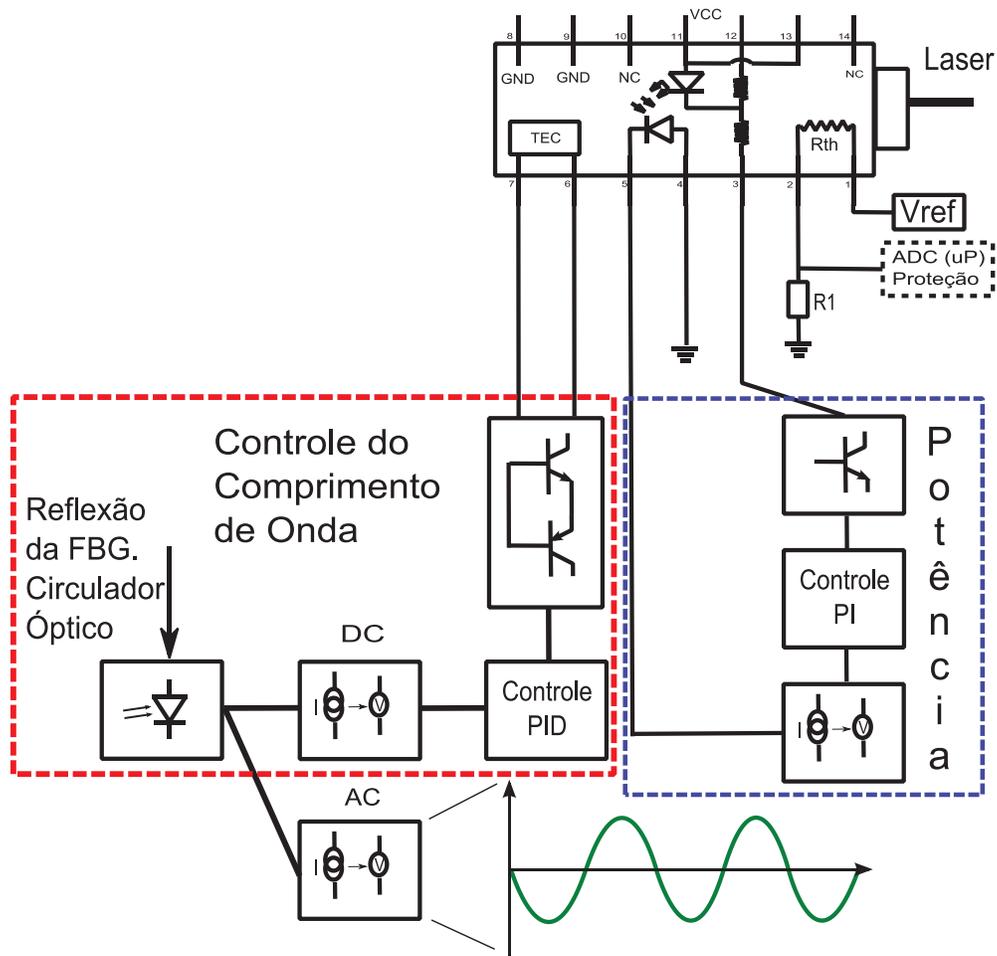


Figura 3.3 - Diagrama de Blocos do Sistema.

O termistor interno do dispositivo laser tem dupla função: ele é usado para informar o limite operacional (para evitar operações indevidas que poderiam levar à sua queima) e também é usado quando este sistema está dedicado para a medida de temperatura, como será apresentado no Capítulo 5. Com a função de atuar na proteção do dispositivo laser temos a tensão  $V_{th}$ , que vem de um divisor de tensão  $R_{th}$ - $R_1$ , usado para linearizar a variação da tensão em função da temperatura interna.

### 3.3 – SINTONIA DO FEIXE DO LASER NA GRADE DE BRAGG (FBG).

Para facilitar a operação dos circuitos há a necessidade de ter uma Grade de Bragg e um dispositivo laser com comprimentos de onda o mais próximos possível nas mesmas condições de temperatura (25°C) porque para que tenhamos sinal refletido pela grade de Bragg precisamos sintonizar o feixe de luz laser em algum ponto dentro da largura de banda desta grade. Se a grade e o feixe de luz estiverem em comprimentos de onda muito distantes os circuitos eletrônicos que geram as correntes para o TEC deverão gerar correntes desnecessariamente grandes ou até mesmo não conseguir executar a sintonia.

A limitação informada no manual do fabricante do dispositivo laser é de uma excursão máxima de 2nm no comprimento de onda do feixe de luz laser. Caso a grade esteja sintonizada sobre o comprimento de onda central (nominal do dispositivo laser), o sistema poderá excursionar 1nm para cada lado, e este valor determina a faixa de temperaturas em que este sistema pode ser utilizado.

Vemos na figura 3.1 que para uma grade centrada a 25°C em 1551,10 nm a reflexão passa de 0% a 100% para o comprimento de onda variando entre o limite inferior de 1550,65 nm e superior 1551,55 nm, já que cada rampa da grade possui aproximadamente a largura de 0,3 nm. As duas rampas da grade são os objetivos da sintonização, como vemos na figura 3.4, que mostra também o ponto ideal de sintonização “Q”.

Caso tenhamos um sinal AC aplicado pelo elemento sensor na grade, a informação dessa tensão mecânica aplicada e o efeito da temperatura retornarão misturados no sinal luminoso, o interrogador tem um conjunto de circuitos que são capazes de separar as componentes AC (informação desejada) e DC (componente da temperatura).

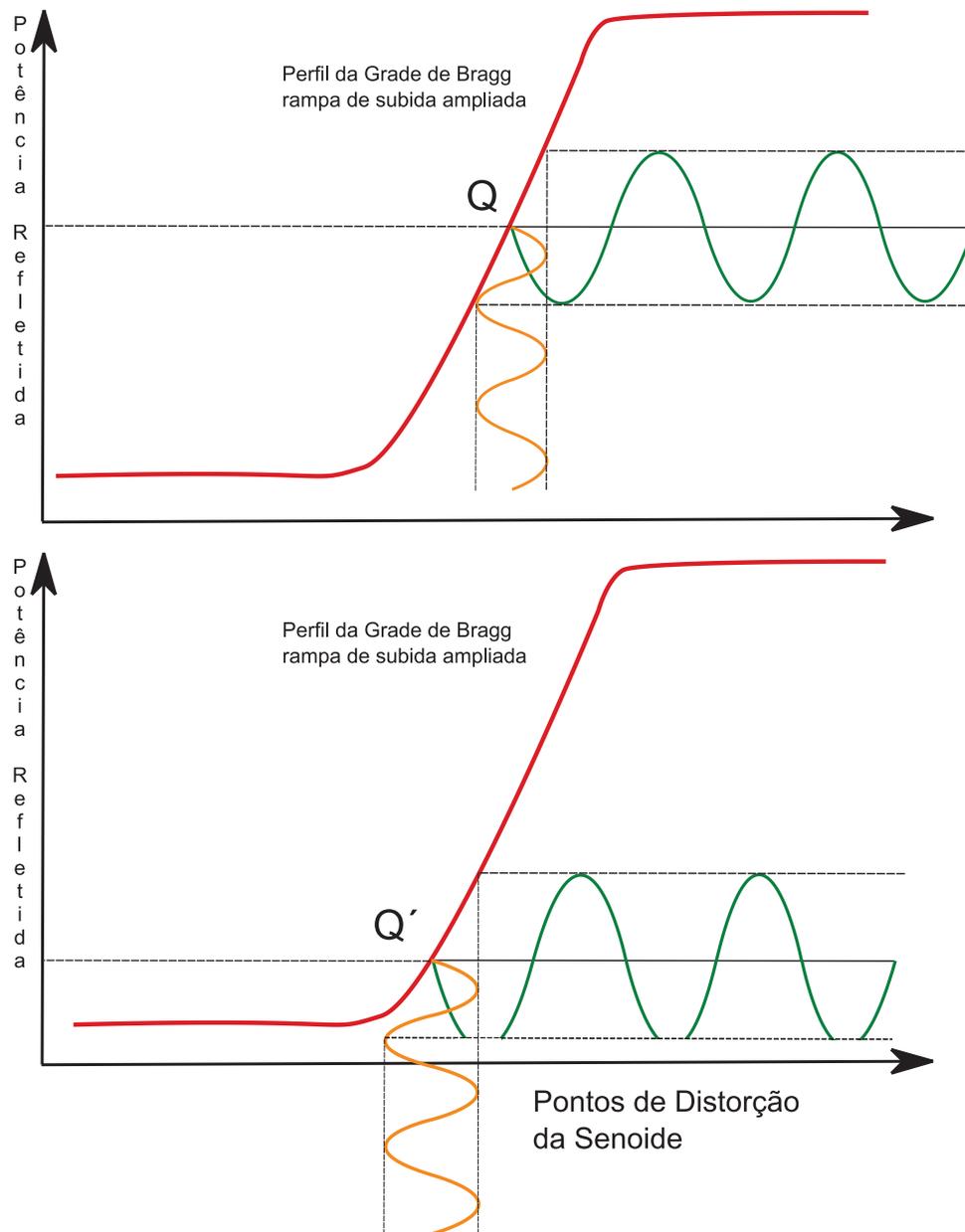


Figura 3.4 - Rampa de subida ampliada.

Com a aplicação da tensão mecânica o perfil da grade oscila na figura 3.4 (senoide vertical) vemos o sinal que será refletido em nosso fotodiodo (senoide horizontal). Há a necessi-

dade da escolha adequada do ponto de operação para evitar a distorção da senoide, como no ponto de operação  $Q'$ , que resulta em um sinal ceifado de suas cristas negativas, produzindo a perda de informação.

Devido ao fato exposto anteriormente, o método de interrogação usado consiste em sintonizar a frequência do feixe de luz laser com o sinal refletido pela grade em um valor médio, como proposto inicialmente por Ferreira et al [1] [2] central em uma das rampas do perfil da grade.

Caso a temperatura da fibra óptica varie, teremos uma componente DC diferente da programada como o valor da referência, para compensar essa variação na sintonia, os circuitos alteram o comprimento de onda central do dispositivo laser garantindo a volta do sistema ao ponto de trabalho da grade. Os circuitos eletrônicos foram desenvolvidos para se controlar o TEC do dispositivo laser a fim de compensar a variação de temperatura e manter-se o sistema operando sobre o ponto de operação desejado  $Q$ .

Caso nosso sistema tivesse uma oscilação da potência óptica do dispositivo laser isso implicaria em variação no nível DC que seria visto pelo sistema como sendo uma mudança de temperatura. Para eliminar este efeito indesejável, foi implementado um circuito eletrônico realimentado que mantém a potência óptica constante. O fotodiodo interno do dispositivo gera a corrente de referência proporcional à potência óptica gerada, na primeira parte do circuito essa referência de corrente é transformada em Tensão, que juntamente com uma tensão de referência alimentam um controle PI bastante simples, o resultado da diferença destes dois valores é usado para compensar a variação da potência óptica, injetando-se mais ou menos corrente no laser.

A sensibilidade de uma grade de Bragg é de aproximadamente de  $0,01\text{nm}/^\circ\text{C}$ , então vemos que o sistema desenvolvido pode sofrer uma variação na temperatura na grade de  $100^\circ\text{C}$  para cima e para baixo da temperatura ambiente de referência ( $25^\circ\text{C}$ ).

Portanto, se o sensor for submetido a variações de temperatura na faixa de  $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$  o laser continuará sintonizado corretamente e o interrogador deve operar normalmente dentro desta faixa de temperatura de variação no sensor.

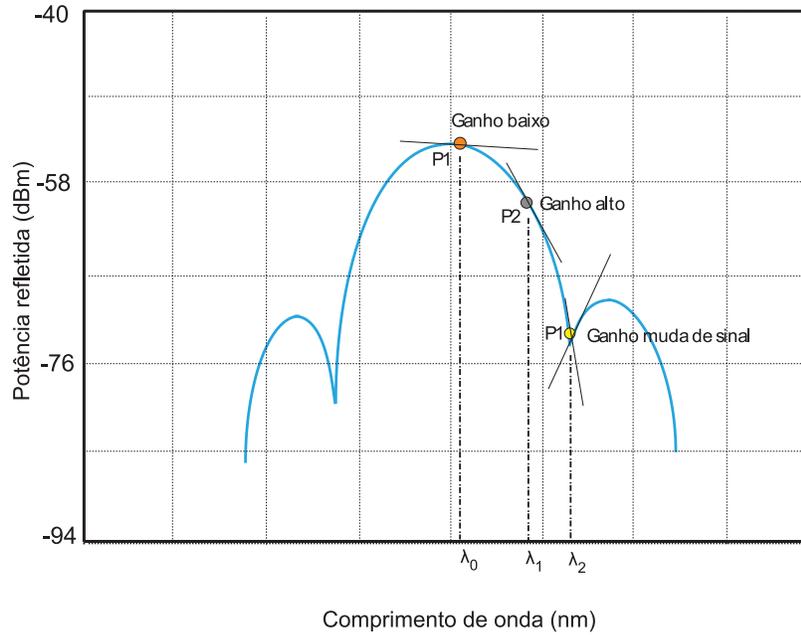


Figura 3.5 - Mudança de ganho no perfil da FBG.

Vamos analisar em um perfil qualquer de grade os ganhos relacionados ao posicionamento do ponto Q. Vemos na figura 3.5 que esse posicionamento além de impedir que o sinal desejado seja ceifado no interrogador ele também poderá inexistir ou ser muito pequeno para o amplificador de transimpedância dimensionado (para o caso de  $\lambda_0$ ) ou até ter sua fase invertida dependendo (para o caso de  $\lambda_2$  na figura 3.5) de ser posicionado na rampa de subida de uma das harmônicas (lôbulos laterais) da FBG. Há que se destacar que foi evitado o uso de grades com lóbulos tão acentuados, assim optou-se pelas grades chirped para que fosse possível ou mais fácil sua sintonização.

## 4 CAPÍTULO – DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DO *HARDWARE*

### 4.1 - CIRCUITOS DE TRANSIMPEDÂNCIA E PID DE CONTROLE.

Nesta nova técnica desenvolvida, a luz refletida da FBG sensora é recebida em um único fotodiodo que está conectada a dois amplificadores de transimpedância que são responsáveis por converterem o sinal de corrente proveniente do fotodiodo em sinal de tensão. Este sistema está representado no circuito da figura 4.2. O primeiro amplificador de transimpedância é usado para extrair e amplificar o sinal AC enquanto o outro extrai a componente DC, que é usada para controlar o TEC do dispositivo laser e estabilizar o ponto de operação da FBG. A figura 4.1 mostra uma simulação do sinal de corrente do fotodiodo PD1.

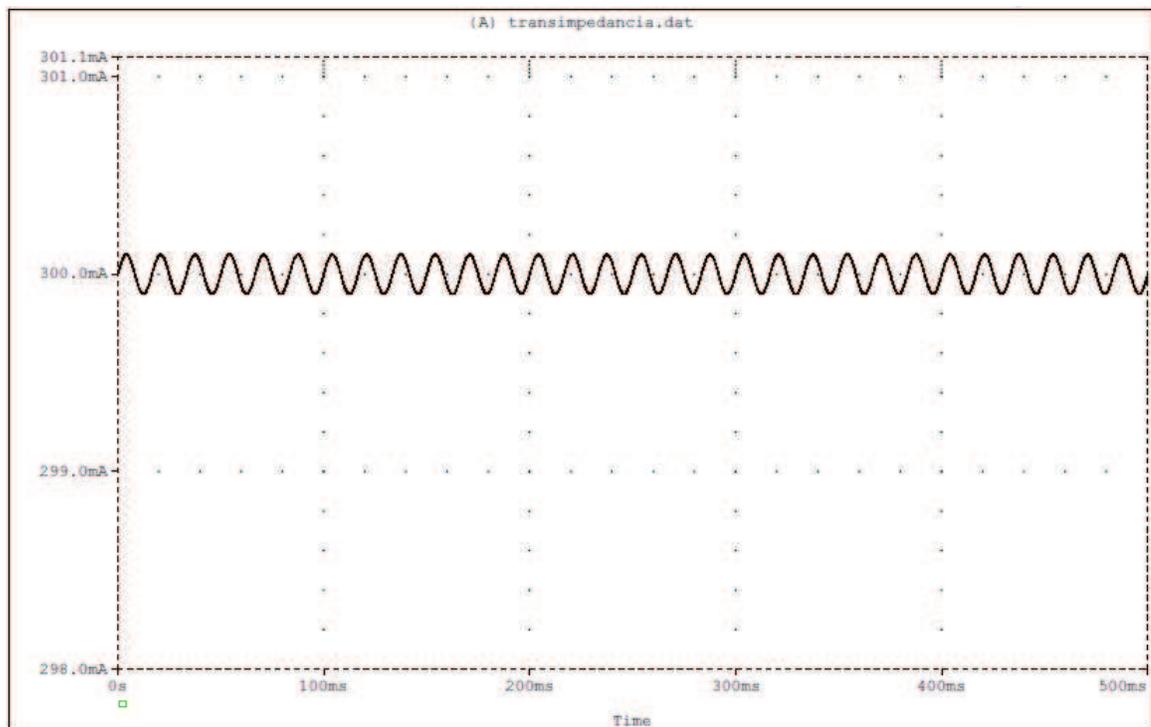


Figura 4.1 - Sinal de entrada do Fotodiodo.

Temos que ressaltar uma característica do sinal de entrada do fotodiodo PD1 (que é conectado entre as entradas dos amplificadores de transimpedância A1 e A2, como mostrado na figura 4.2), que é o fato deste sinal ter uma componente DC muito maior (de aproximadamente 300mA) do que a componente AC (100 uA), dificultando muito a separação dos componentes desejados [1].

A corrente de entrada dos amplificadores operacionais usados, OPA177 [16], é tipicamente 1,2 nA, o que é insignificante quando comparado à corrente do fotodiodo (que é da ordem de 0,3 mA para a potência de saída usada de 1mW) e então assumimos que a corrente do fotodiodo flui somente nas impedâncias de realimentação de ambos amplificadores. O Amplificador A1 é um amplificador convencional de transimpedância com um resistor em realimentação R1, responsável por gerar o sinal DC que será usado para estabilizar e controlar o ponto de operação da FBG. O capacitor C1 é adicionado ao caminho de realimentação para reduzir a largura de banda e eliminar qualquer problema de estabilidade que possa aparecer nesta configuração.

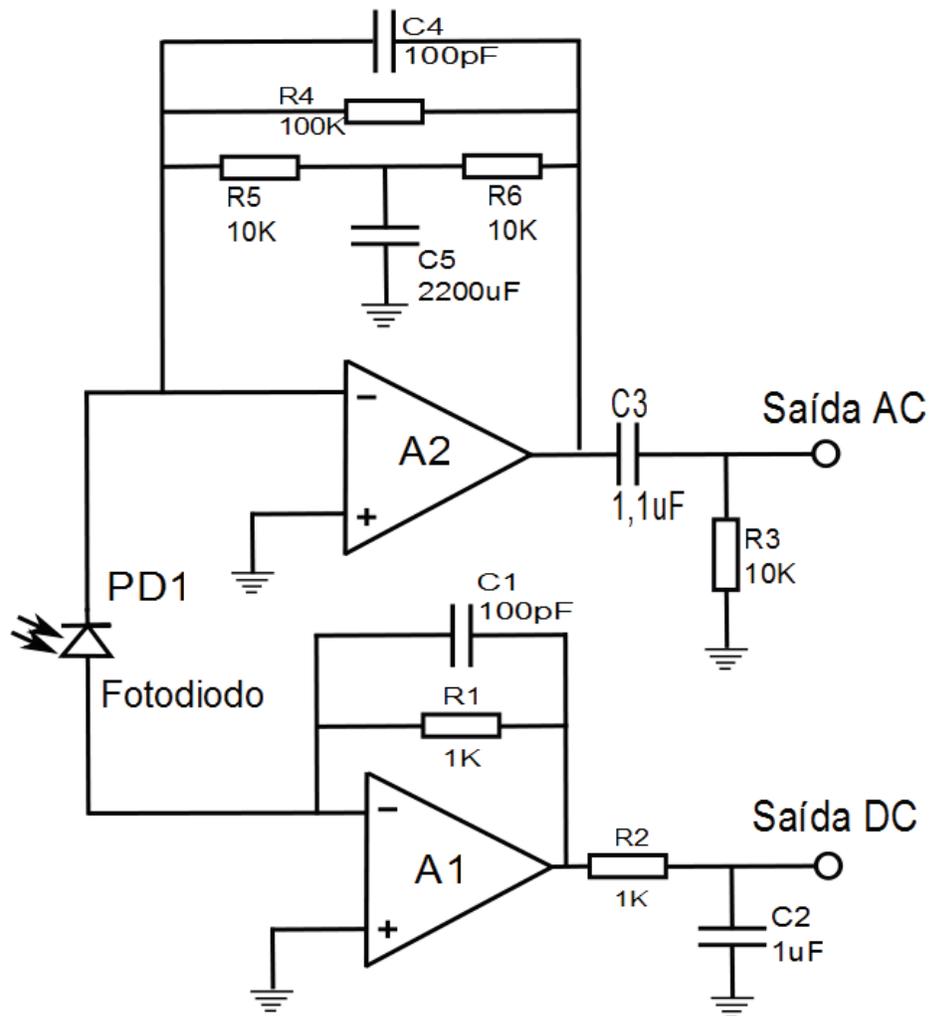


Figura 4.2 – Esquemático dos amplificadores de Transimpedância e Fotodiodo.

A componente AC de 60 Hz, que aparece na FBG devido a sua modulação em torno do ponto de operação causado pela deformação da grade de Bragg, é muito pequena (poucos pm de variação no comprimento de onda central da grade de Bragg). Este sinal AC é eliminado da saída de A1 por um filtro passa-baixa composto por R2-C2. Para medir a pequena componente AC, o amplificador A2 usa uma realimentação em malha T, que resulta em um amplificador com alto ganho AC combinado com um baixo ganho DC. Para remover qualquer componente DC residual da saída de A2, um acoplador AC (C3-R3) é usado na sua saída.

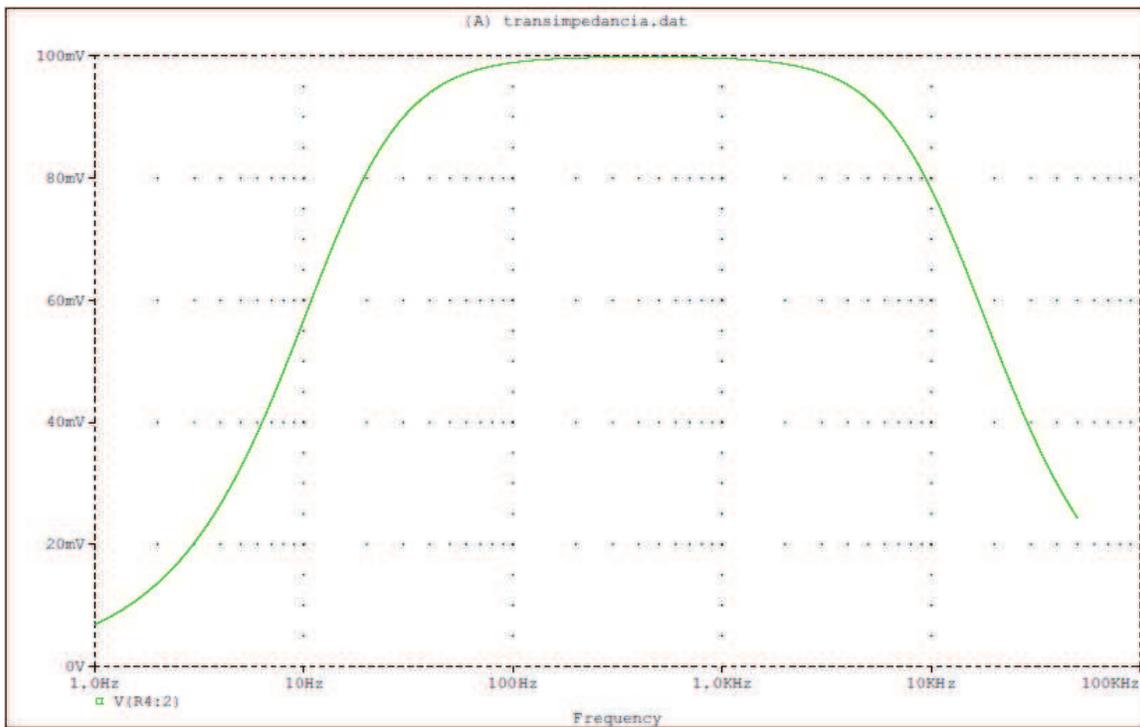


Figura 4.3 - Resposta em frequência do circuito Transimpedância AC.

A operação deste circuito resulta em um amplificador de transimpedância que responde basicamente somente ao sinal de luz AC criado pela modulação mecânica na grade de Bragg. A figura 4.3 ilustra a resposta em frequência simulada dessa configuração do amplificador AC, que possui um ganho máximo de pouco mais de 40 dB para a faixa de frequência próxima de 60Hz.

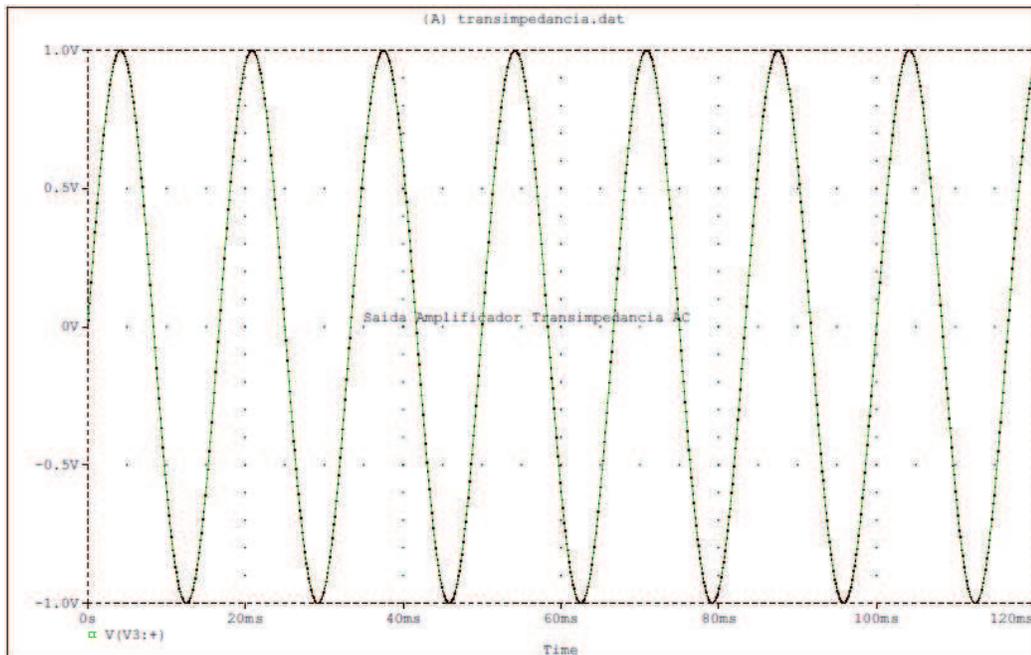


Figura 4.4 - Saída do Amplificador de Transimpedância AC.

A figura 4.4 mostra o resultado de uma simulação em transiente no circuito eletrônico da figura 4.2.

Como mencionado anteriormente (seção 3.3), o sistema é iluminado por um laser DFB com comprimento de onda  $\lambda_0$  que é aproximadamente centrado na rampa positiva (ou na rampa negativa caso seja conveniente) do perfil da FBG. Como a inclinação do perfil da grade de Bragg é muito alta (cerca de 90 mV/pm), este esquema de demodulação nos leva a um detector de alta sensibilidade.

Entretanto, qualquer variação DC do comprimento de onda central da FBG move o sistema para longe do ponto de operação ideal. Por exemplo, como a sensibilidade típica à variações de temperatura da FBG nua é de aproximadamente de 7 a 12 pm/°C, uma variação de temperatura de somente 10°C no sensor de FBG causaria uma falha completa na operação do interrogador, como pode ser visto na figura 4.5 onde o feixe de *laser* está muito longe da

rampa positiva da Grade de Bragg. Nesse caso a reflexão da FBG é zero não chegando nenhuma luz ao fotodiodo deixando a saída do amplificador DC em 0 V. Assim um controle preciso do ponto de operação do sistema é extremamente necessário.

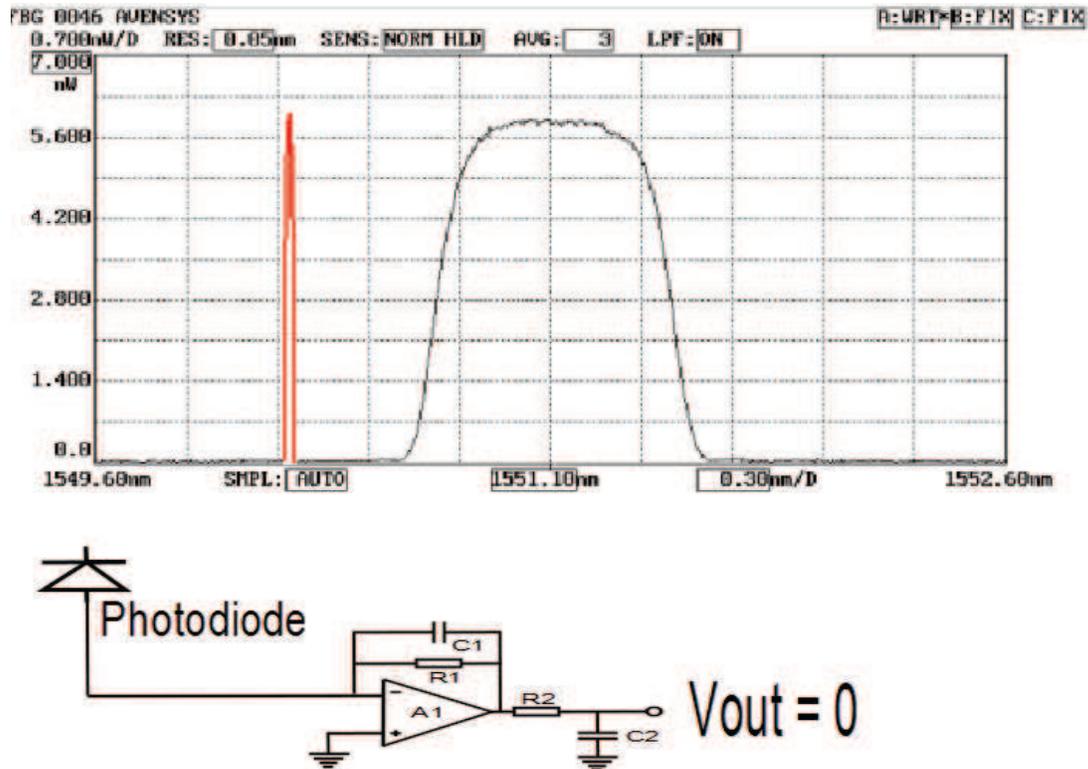


Figura 4.5 - Dispositivo Laser dessintonizado da FBG.

Para implementar este controle do ponto de operação foi desenvolvido um controlador PID analógico foi usado para controlar o gerador de corrente que alimenta o TEC (Thermo Electric Cooler) interno ao dispositivo *laser*. Depois um ponto de operação foi escolhido, a saída de tensão DC do amplificador de transimpedância A1 da figura 4.2 é medida e esta tensão é ajustada em um potenciômetro e usada como referência ( $V_{ref}$  que recebe um sinal de controle do microprocessador, DAC1) para o controlador do PID. O circuito do controlador PID é mostrado na Figura 4.6.

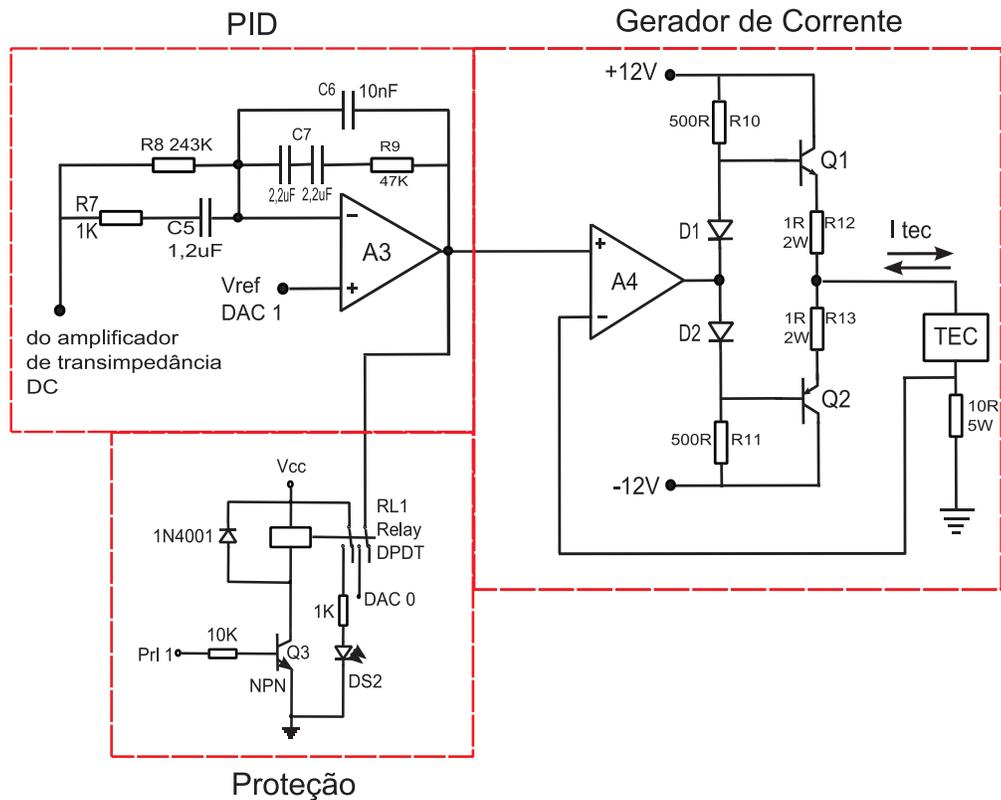


Figura 4.6 – Controlador PID analógico, gerador de corrente e proteção usados para estabilizar o ponto de operação da FBG.

A saída do PID vai para o gerador de corrente, descrito na figura 4.6. Se a diferença das tensões nos terminais de A4 for positiva, haverá uma tensão positiva proporcional a essa diferença em sua saída; essa tensão aumentará a tensão no emissor do transistor Q1 e produzirá uma corrente que passa por R12 em direção ao TEC. Para o caso contrário (uma diferença negativa nos terminais de A4) existirá uma tensão negativa na saída do PID, transferindo uma tensão negativa no emissor de Q2, gerando uma corrente do TEC que passa por R13, no sentido contrário à corrente gerada anteriormente. Estes fluxos de corrente esquentam ou resfriam o laser, alterando o comprimento de onda gerado de forma a corrigir qualquer erro que exista no ponto de operação.

Tabela 4.1 - Variáveis do Controlador PID.

Controlador	Kp	Ki	Kd
PID	0.18	1.87	0.04

Em destaque na figura 4.6 estão também os circuitos eletrônicos usados como proteção e ajuste inicial do comprimento de onda do feixe *laser* na rampa da FBG. O sinal PRL1 vem do microprocessador para acionar o relé RL1 colocando o sinal da DAC0 na saída de A3, retirando assim o controle do PID sobre o gerador de corrente do TEC. Quando o comprimento de onda é variado pelo microprocessador através do DAC0 e começa a “subir”, ao encontrar-se na rampa da FBG, próximo ao ponto de operação, o PID é reinsertido na malha e passa a controlar o comprimento de onda na saída do laser.

A operação é também realizada com o intuito de proteger o laser, sendo que neste caso o DAC0 colocará 0 V no gerador de corrente, zerando também a corrente do TEC, isto trará a temperatura interna do laser para a temperatura ambiente.

## 4.2 – ALIMENTAÇÃO.

A literatura menciona que a muitos lasers semicondutores queimam devido ao transiente no momento em que se liga a alimentação do circuito. Para minimizar este problema foi construída uma fonte de alimentação com partida “soft-start”, através de um conjunto de circuitos eletrônicos que controlam a tensão de partida da alimentação, aumentando-a gradativamente.

O sistema de controle está sendo alimentado por quatro fontes separadas, que usam um transformador com dois enrolamentos. No primeiro enrolamento está a saída de 5V, usada para o circuito digital e a fonte de alimentação, com saída em  $\pm 12V$ , que fornece energia para o circuito analógico e a fonte de alimentação do dispositivo *laser* com partida “soft-start”. Por ser um circuito que consome mais potência, a alimentação do (TEC) Peltier [15] é retirada do outro enrolamento do transformador.

### 4.3 - CONTROLES DE POTÊNCIA.

Os circuitos eletrônicos que controlam a potência do dispositivo *laser* foram projetados 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 em *hardware* foi o PI (proporcional-integral).

O esquema elétrico do controle da potência está ilustrado na figura 4.7 e a tabela 4.2 mostra os valores das constantes do PI que foram utilizados. O controle proporcional-integral trabalha da seguinte maneira: se o valor medido através do fotodiodo interno ao encapsulamento do *laser* diferir do valor de referência, o amplificador de erro do controlador PI irá corrigir, aumentando ou diminuindo o valor da corrente injetada no dispositivo *laser*, para compensar esta variação de potência óptica.

A tensão de referência é 2.5V e os componentes externos foram calculados para uma potência óptica de laser de 1mW, como já foi mencionada, a menor potência necessária para uma reflexão na FBG estável.

Para proteção do dispositivo *laser*, foi colocado um diodo *Zener* na base do transistor, desta forma garantindo que a corrente máxima no dispositivo *laser* não ultrapasse 150 mA,

conforme especificado no manual do usuário. Foi colocado um diodo reverso ao dispositivo, para evitar correntes reversas indesejáveis.

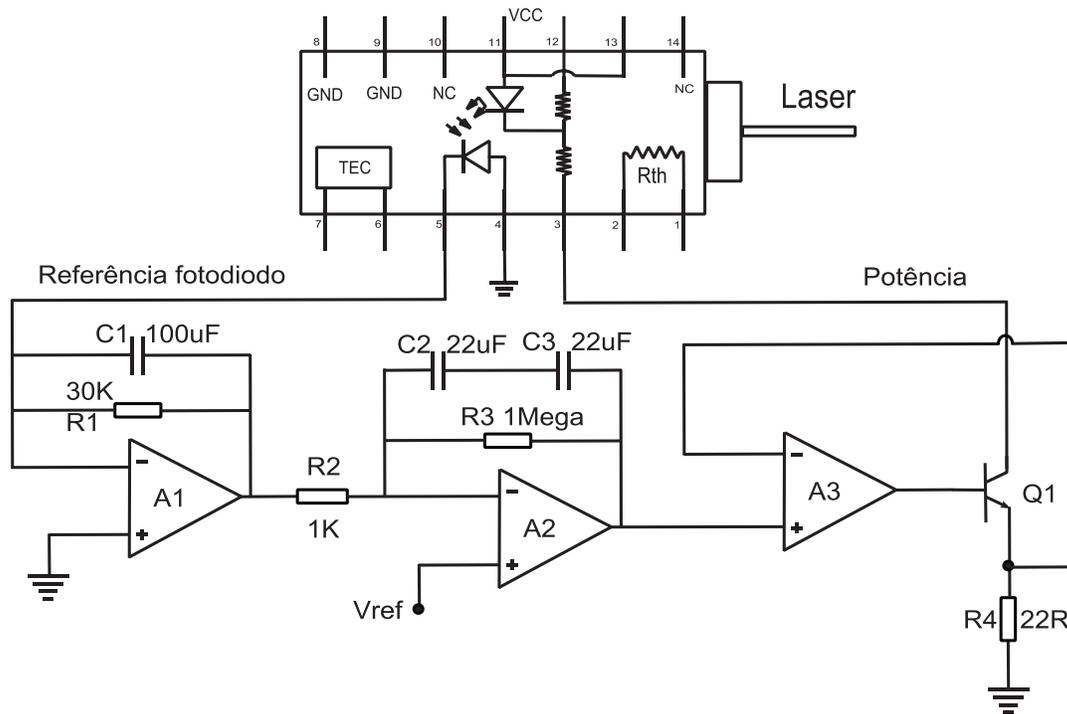


Figura 4.7 - Controle de Potência [17].

TABELA 4.2 – VARIÁVEIS DO CONTROLADOR PI.

Controlador	Kc	Ki
PI	1000	90

## 4.4 - CIRCUITO DE PROTEÇÃO.

Conforme as especificações do dispositivo *laser* [14], a sua temperatura interna está limitada entre dois patamares, 15°C e 35°C. Para garantir que estes limites não sejam excedidos, foram desenvolvidos dois circuitos de proteção que monitoram o termistor do dispositivo *laser*, mostrado na figura 3.3 do capítulo anterior, um por *hardware* e outro por *firmware*. A primeira proteção é feita por *hardware*. Toda vez que a temperatura interna do *dispositivo laser* exceder os extremos de limites especificados, o comparador (A1+A2) do circuito da figura 4.8, coloca a saída em nível lógico '1', fechando o relé RL2 e interrompendo a circulação de corrente no (TEC) *peltier*. Desta forma causando o aquecimento ou o resfriamento do dispositivo e fazendo com que a temperatura volte a operar dentro do especificado, considerando que o dispositivo *laser* está em um ambiente com temperatura controlada. A figura 4.8 ilustra o diagrama de bloco da proteção por *hardware* [18].

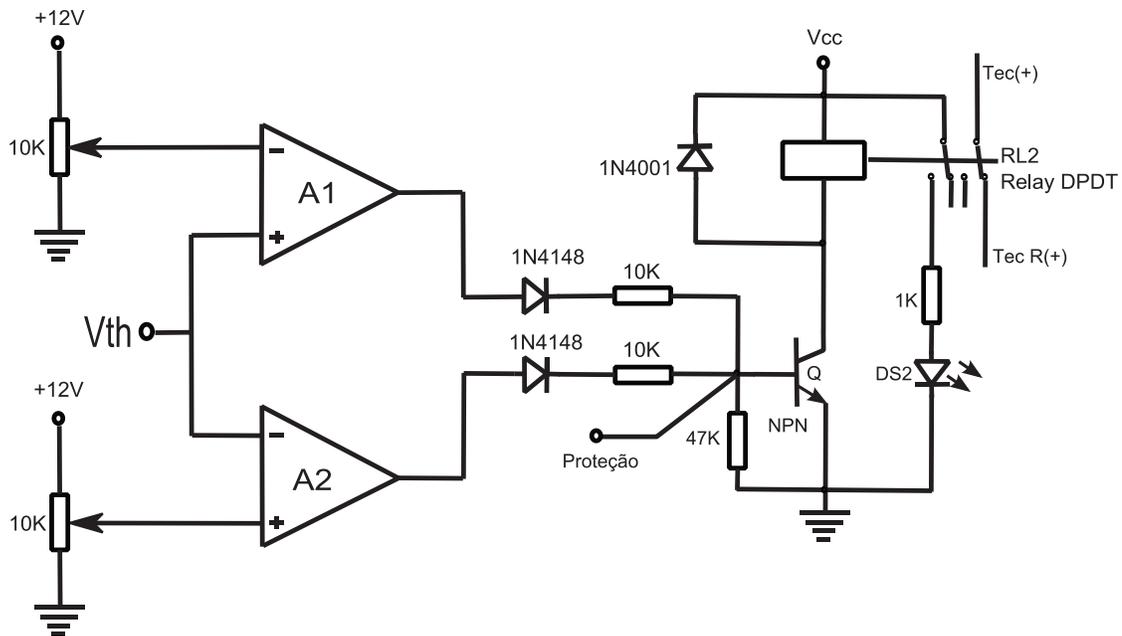


Figura 4.8 - Circuito de Proteção.

O elemento termistor do dispositivo *laser* é usado como sua referência de temperatura interna. Na figura 3.3 no capítulo anterior pode-se ver que o termistor forma um divisor de tensão com um resistor R1 e ambos estão alimentados por um circuito de referência. Este circuito divisor é uma forma de linearizar a resposta da temperatura do elemento termistor. A tensão entre Rth e R1 é a tensão linearizada Vth mostrada na figura 4.8.

A outra proteção é feita por *firmware*. Ao monitorar o termistor e constatar que houve excesso de limites de temperatura interna do dispositivo, o *firmware* aciona o relé RL1 da figura 4.6 e coloca o DAC0 em '0' volts, fazendo com que o dispositivo estabilize em 25°C. O fluxograma da proteção por *firmware* está ilustrado na figura 4.12. Embora uma proteção seja suficiente, foi feita uma redundância por precaução, pois o dispositivo é o item mais caro dentro dos equipamentos eletrônicos utilizados neste projeto e variações de temperatura acima dos limites técnicos do laser é um dos vários motivos de queima deste dispositivo.

## 4.5 - CONVERSOR

### 4.5.1 - Conversor Digital-Analógico.

Neste projeto foram utilizados dois conversores D/A. O primeiro, DAC1, gera a tensão de referência (*set point*) do estágio amplificador de erro do controle proporcional-integral (PI) dos circuitos eletrônicos de potência do dispositivo *laser*, e serve como tensão de referência do controle PID do TEC. O segundo conversor, DAC0, serve para fazermos a varredura com o dispositivo *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 assim a sua configura-

ção como saída diferencial ou como saída única (positiva ou negativa). O casamento de corrente do DAC proporciona um erro de escala total melhor que +/- 1 LSB e não linearidade causada melhor do que +/- 0.1%, eliminando a necessidade de ajustes externos.

A figura 4.9 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 dispositivo *laser*, como mencionado anteriormente.

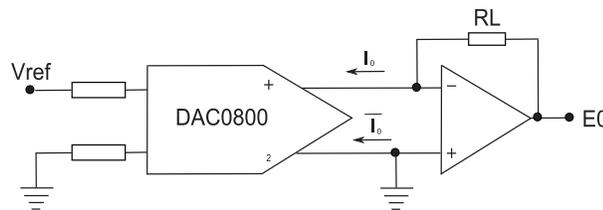


Figura 4.9 – DAC0800

A tensão de saída do DAC1, com saída positiva, é dada pela equação abaixo:

$$V_0 = \frac{V_{ref}}{R_{ref}} \cdot \frac{255}{256} \quad (8)$$

A configuração da figura 4.10 foi utilizada para gerar tensão simétrica necessária para achar o ponto de operação da grade na varredura inicial do firmware.

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

$$V_0 = V_{ref} \cdot \left( \frac{-255}{256} \cdot \frac{2.X}{256} \right) \quad (9)$$

Onde:

$X$  = é o código de entrada

$$R_l = /R_l = R_{ref}$$

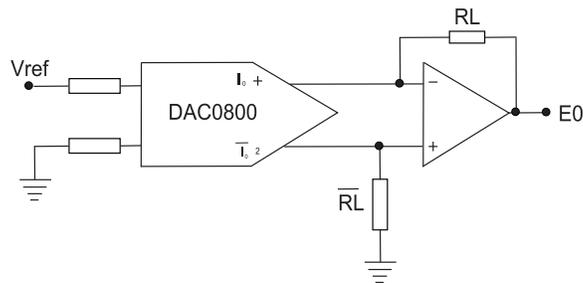


Figura 4.10 – DAC com saída simétrica.

#### 4.5.2 - Conversor Analógico-Digital.

O microcontrolador ATMEGA32 disponibiliza internamente um conversor analógico-digital de 10 bits do tipo de 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  $V_{ref}$  e Gnd. O ADC permite colocar uma tensão de referência ( $V_{ref}$ ) externa através do pino AREF. Para ter uma boa tensão de referência, que não varie com a temperatura, foi colocado um cir-

cuito integrado que implementa a função de referência de 2,5V com variação máxima de 10ppm/°C.

O conversor ADC está operando em modo “single conversion”. A conversão é iniciada quando o bit ADSC é configurado com valor igual a ‘1’. 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 expresso pela equação abaixo:

$$ADC = \frac{V_{in} \cdot 1024}{V_{ref}} \quad (10)$$

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

A tensão de referência, como explicado anteriormente,  $V_{th}$ , vem do divisor resistivo com o termistor do dispositivo *laser*, e serve para medir a temperatura do laser com o conversor ADC de 10 bits. Para linearizar a resposta do divisor resistivo do termistor com o resistor ( $R_{th}$ ) foi escolhido o resistor de valor 5,11 kΩ. [19].

#### 4.6 - COMUNICAÇÃO SERIAL – RS232.

A comunicação entre os periféricos é feita através de uma interface serial RS232, onde os bits são enviados sequencialmente. O Byte é transmitido da seguinte forma: inicia-se a transmissão com um “start bit”, em seguida envia 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”.

O RS232, também conhecido por EIA RS232 ou V.24, é um padrão para troca serial de dados binários entre um DTE, terminal de dados, de “Data Terminal Equipment” e um

DCE, comunicador de dados, de “Data Communication Equipment” sendo comumente usado nas portas seriais dos PCs. Como os periféricos que fazem interface com o sistema 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 comunicação serial configurada é assíncrona e foi ajustada em 9600 bps, sem controle de fluxo.

#### 4.7 – DESENVOLVIMENTO DO *FIRMWARE*

O microcontrolador utilizado foi o ATMEGA32 do fabricante ATMEL, com “core” AVR de 8 bits e 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.
- Verificar a Saída do Amplificador AC.
- Efetuar a Leitura e Transmissão dos dados do Amplificador AC.
- Fazer uma filtragem digital.
- Proteger o dispositivo *laser*, impedindo-o sair da temperatura de especificação.

O *firmware* está dividido basicamente em dois blocos. O primeiro bloco é responsável pelo início da sintonia do feixe *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 dispositivo *laser*.

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 0 V no DAC0 e fecha o relé RL1, para garantir que o dispositivo *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 segundos (s).

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-se o relé RL1 para que o PID analógico controle os circuitos. Caso contrário, se o ponto não é encontrado, a proteção entra em operação. Depois de tudo ajustado e o laser sintonizado, o microprocessador passa somente a verificar a proteção e transmitir via interface na serial os dados da saída do amplificador de transimpedância AC.

O fluxograma do circuito de proteção do laser é representado na figura 4.11. Como explicado no item 4.4 “Circuito de Proteção”, esta parte do “firmware” é responsável pelo controle da temperatura de operação do dispositivo *laser*. No caso da temperatura sair do especificado do manual do dispositivo *laser*, ou seja, de 15° à 35°, o que equivale a 0,636 e 1,06V de  $V_{th}$  respectivamente, o circuito “desliga” e retorna ao valor padrão de operação em 25°C.

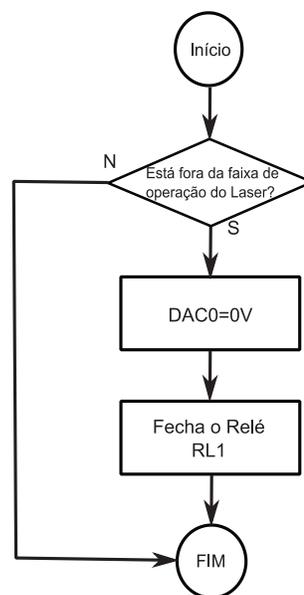
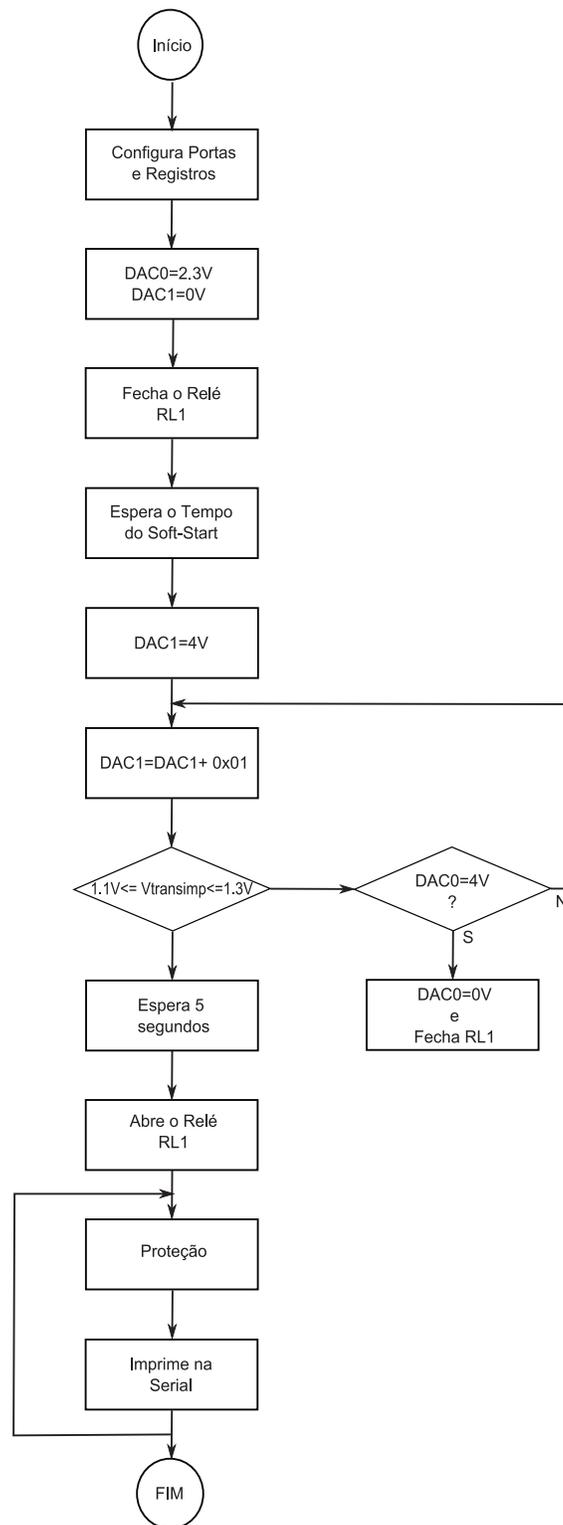


Figura 4.11 - Fluxograma da Proteção.

Figura 4.12 - Fluxograma do *Firmware*.

#### 4.8 - PROJETO DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO (PCB).

A figura 4.13 mostra o *layout* da placa de circuito impresso dupla face do sistema completo do interrogador.

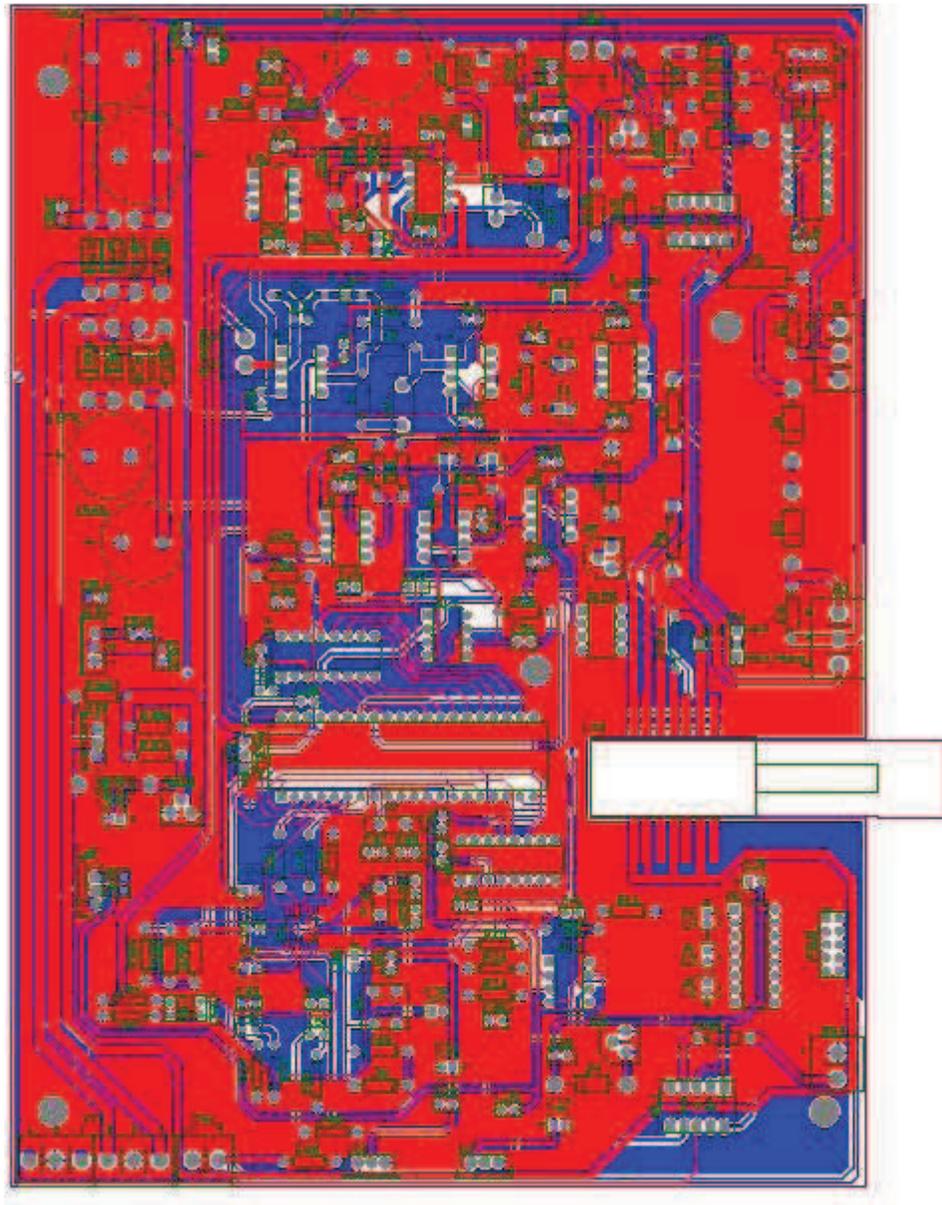


Figura 4.13 - Layout da Placa de Circuito Impresso.

Na figura 4.14 vemos uma foto de um protótipo do interrogador.

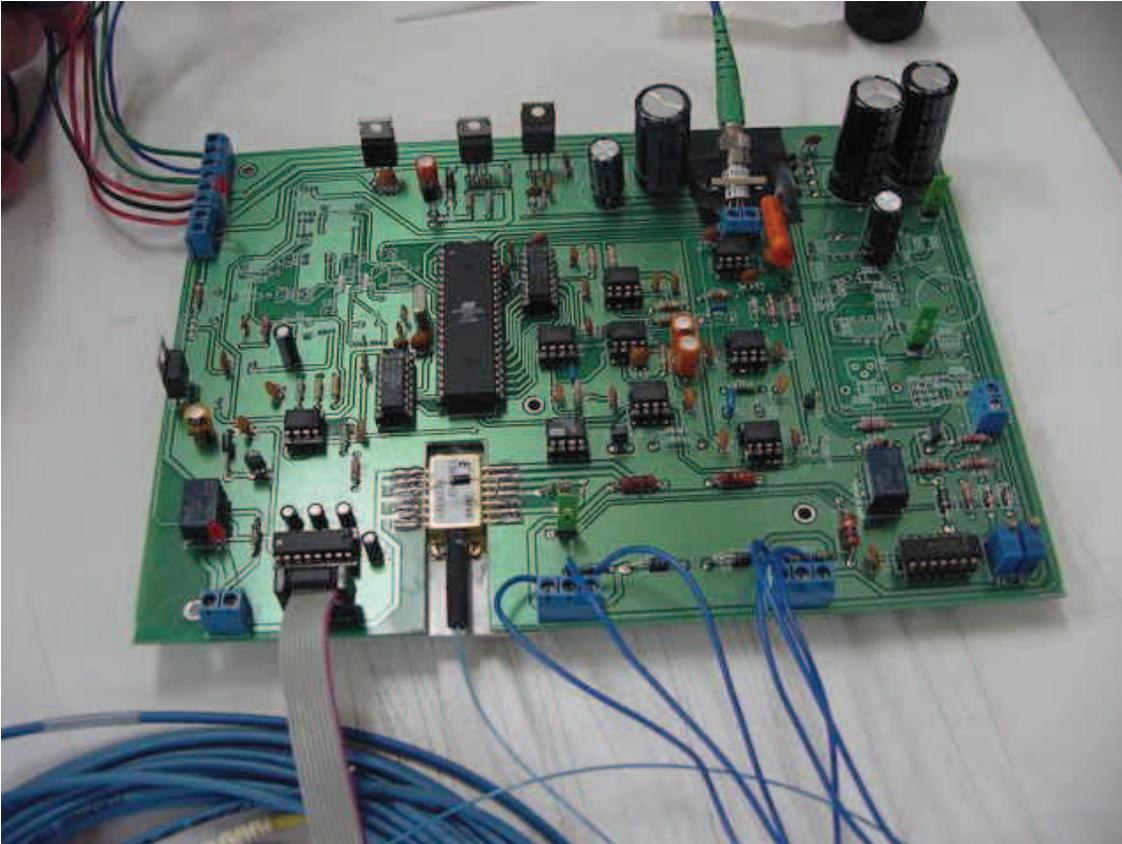


Figura 4.14 - Foto do Interrogador Desenvolvido.

## 5 CAPÍTULO – APLICAÇÕES EXPERIMENTAIS DA TÉCNICA DESENVOLVIDA

### 5.1 - SENSORES DE TENSÃO

A ideia relacionada ao desenvolvimento de um sensor de tensão está atrelada à utilização de materiais sensíveis a campos elétricos. Um elemento sensor de campo elétrico pode ser realizado através da colagem de uma FBG em um cristal piezoelétrico (PZT), já que o cristal piezoelétrico produziria uma deformação mecânica proporcional ao valor do campo elétrico na FBG.

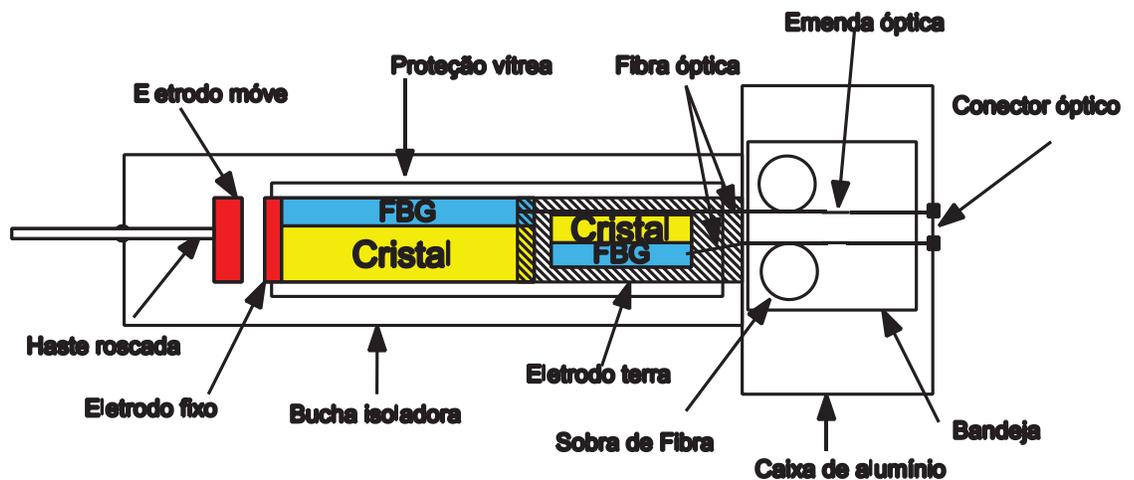


Figura 5.1 - Corte Transversal do Sensor de Tensão.

Piezoelétricidade é a capacidade de alguns cristais gerarem corrente elétrica por resposta a uma pressão mecânica. Este é reversível, pois os cristais piezoelétricos, quando sujeitos a uma tensão elétrica externa, podem sofrer variações de forma. A deformação, cerca de 0,1% da dimensão original em PZT, tem aplicações importantes, tais como a produção e detecção de sons, geração de altas-tensões e geração de frequência eletrônica.

Um transformador de potencial óptico (TPO) construído a partir de um sensor de tensão à fibra óptica, utilizando a montagem do sensor mostrada na figura 5.1 e o interrogador descrito neste trabalho foram desenvolvidos e testados em laboratório e em campo. Nos testes de laboratório, o protótipo sensor respondeu a tensões na faixa de 220 V até 13,8 kV (o valor máximo está limitado à capacidade do gerador de tensão disponível). Em campo, o protótipo do TPO foi instalado na rede interna de treinamento de 13,8 kV da EDP Bandeirante em Mogi das Cruzes – SP.

### **5.1.1 - Teste de Campo.**

O protótipo do TPO, incluindo a unidade sensora e a unidade optoeletrônica, foram instalados na rede de treinamento de 13,8 kV. A unidade sensora foi instalada em poste na rede de treinamento e a unidade optoeletrônica foi instalada na sala de telecomunicações, distante aproximadamente, 100 m da unidade sensora e, para realizar a conexão óptica entre elas, foi instalado um cabo de fibra óptica.

A figura 5.2 mostra a unidade sensora instalada no poste e a figura 5.3 apresenta uma vista da montagem do circuito optoeletrônico, instalado na sala de telecomunicações.

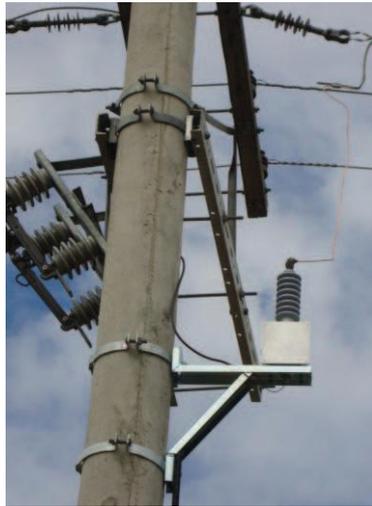


Figura 5.2 - Unidade sensora instalada na rede de treinamento de 13,8kV na EDP Bandeirante.

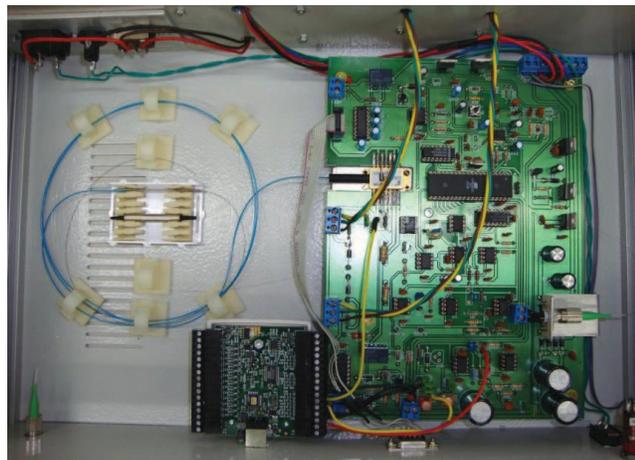


Figura 5.3 - Vista interna da unidade optoeletrônica.

### 5.1.2 - Resultados obtidos.

Conforme pode ser observado na Figura 5.4, em alguns períodos o protótipo do TPO apresenta grandes variações nos valores medidos em relação ao TP convencional, Transformador de Potencial (permite abaixar a tensão da rede para que seja medida em equipamentos de medida convencionais), enquanto que em outros períodos do dia os valores são estáveis.

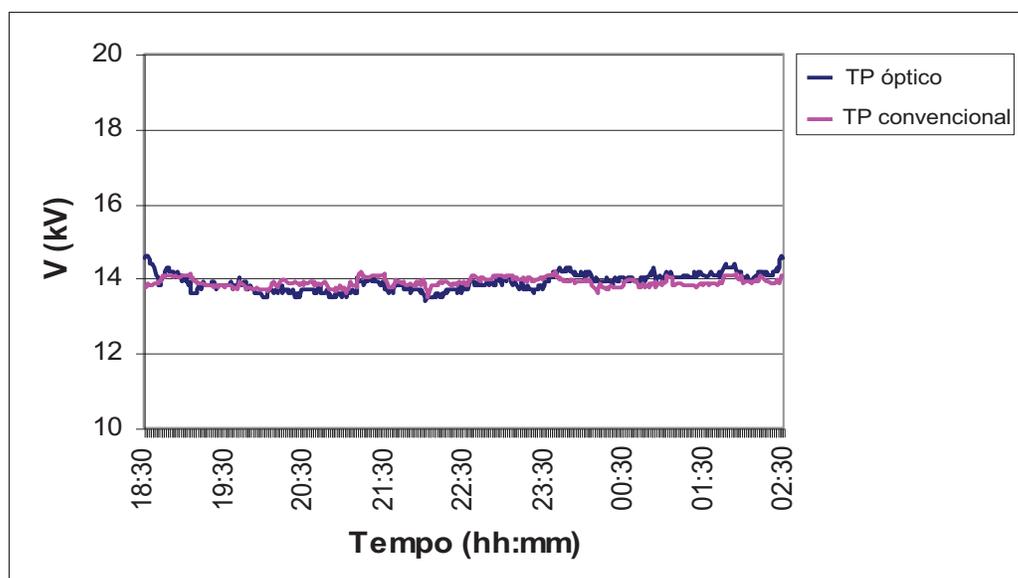


Figura 5.4 - Tensão medida pelo TPO no período das 18h30min do dia 12/02/10 às 02h30min do dia 13/02/10.

A partir da análise detalhada dos dados deverão ser implementados ajustes no protótipo do TPO para garantir a sua correta operação na faixa de temperatura especificada. Foi observado que a presença de corpos próximos ao elemento sensor alteravam de forma significativa a resposta do sensor, e há necessidade de se realizar mais investigações para eliminar a instabilidade do sensor.

## 5.2 - SENSORES DE CORRENTE

Para o caso do sensor de corrente serão apresentados os resultados experimentais básicos de um desenvolvimento de um sensor baseado no efeito de magnetostricção.

### 5.2.1 - Protótipo utilizando Fibra Óptica

Os resultados obtidos com essa montagem foram muito bons, sendo que foi possível obter as medidas de valores de corrente RMS com erros menores do que 1,6%.

O protótipo do transdutor óptico de corrente foi construído e testado em laboratório, onde uma bobina com 280 voltas de fio esmaltado de  $0,33 \text{ mm}^2$  é usada para aplicar o campo magnético no sensor durante os testes experimentais.

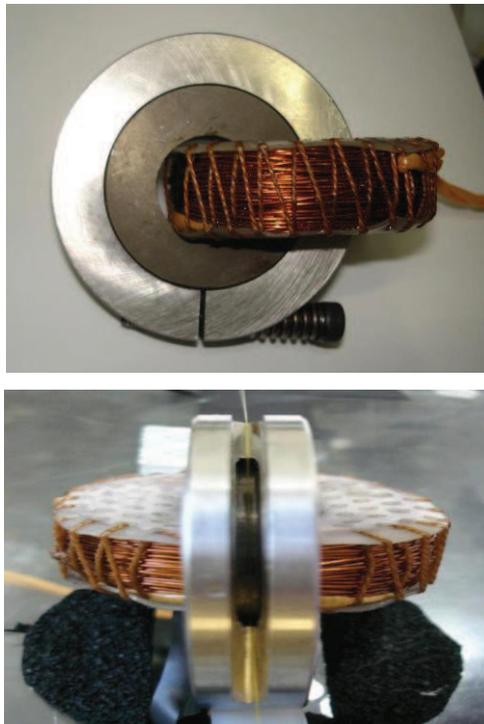


Figura 5.5 - Fotos do Sensor de Corrente.

O Transdutor de corrente ótico foi testado em uma variação de corrente de 180 A até 900 A, para um conjunto de compressões aplicadas ao anel metálico. Na figura 5.6 abaixo vemos um comportamento quase linear entre a corrente e os valores de tensão RMS calculados da saída do amplificador no Interrogador, quando a compressão ideal é aplicada ao material Terfenol-D, que constitui o núcleo do elemento sensor [20].

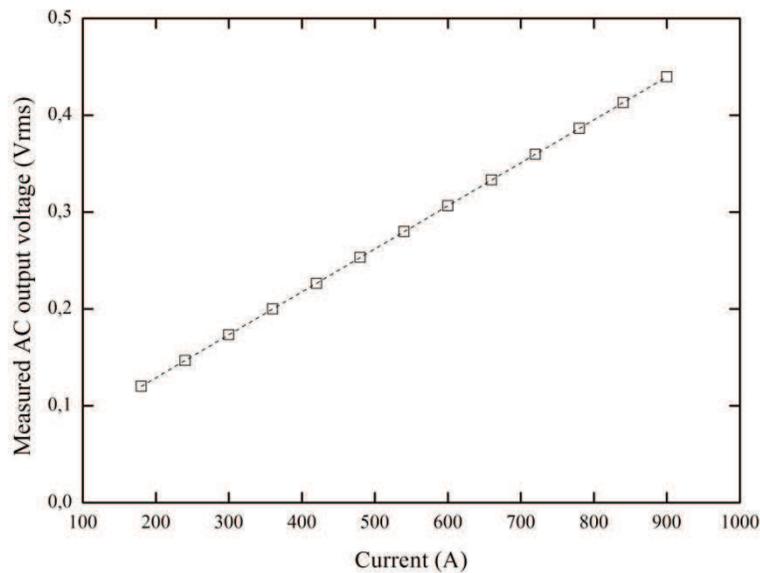


Figura 5.6 - Tensão de Saída RMS em função da corrente [20].

Um gráfico do erro do desvio calculado do valor ideal RMS como função da corrente de entrada é mostrado na figura 5.7 [20].

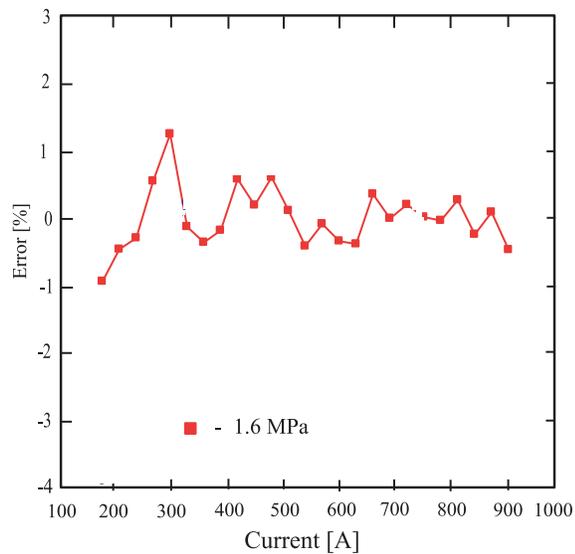


Figura 5.7 - Erro da medida de Corrente [20].

Caso o sistema não possuísse a compensação de temperatura, para uma variação de somente  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  na grade sensora de Bragg teríamos uma falha completa na operação do interrogador. Como o protótipo do transdutor de corrente foi testado em um range de  $15^{\circ}\text{C}$  de temperatura, pudemos demonstrar que a técnica da estabilização do ponto de operação estava funcionando adequadamente. A cola para a fixação da grade de Bragg no elemento de Terfenol-D poderia ser usada somente até  $50^{\circ}\text{C}$ , e por este motivo os testes foram feitos entre a temperatura ambiente e  $45^{\circ}\text{C}$ , permitindo assim uma margem de segurança na temperatura máxima da cola.

Para esta variação de temperatura uma corrente constante de  $800\text{ A}$  foi aplicada ao transdutor de corrente e a tensão rms do sinal de saída foi medida, o desvio de erro percentual a resposta ideal do sistema é apresentado na figura 5.8. Como pode ser observado o interrogador opera corretamente em toda a faixa de temperatura, e os desvios observados do comportamento ideal podem ser atribuídos ao TERFENOL-D quando submetido a tais variações de temperatura.

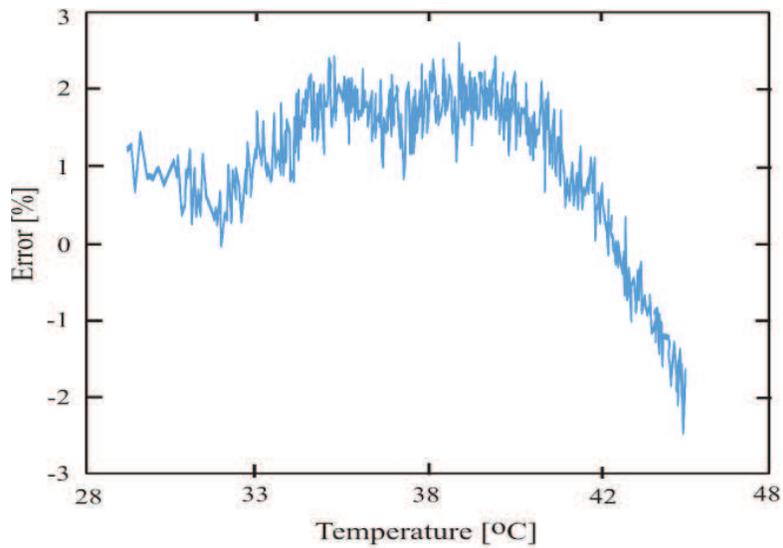


Figura 5.8 - Dependência da Temperatura [20].

### 5.2.2 - Medidas de Resposta a Transiente

O transdutor ótico de corrente foi testado para mudanças abruptas na corrente, simulando uma condição de falha em um sistema de potência, para verificar se o transdutor pode detectar surtos de corrente nas linhas de potência dentro de curtos períodos de tempo. Para realizar o teste, o sensor partia de um estado estacionário, com uma corrente constante, e recebia um degrau de corrente de 150% acima do nominal na bobina (através do gerador de sinal). Os sinais medidos foram obtidos com um osciloscópio, e os resultados são apresentados na Figura 5.9.

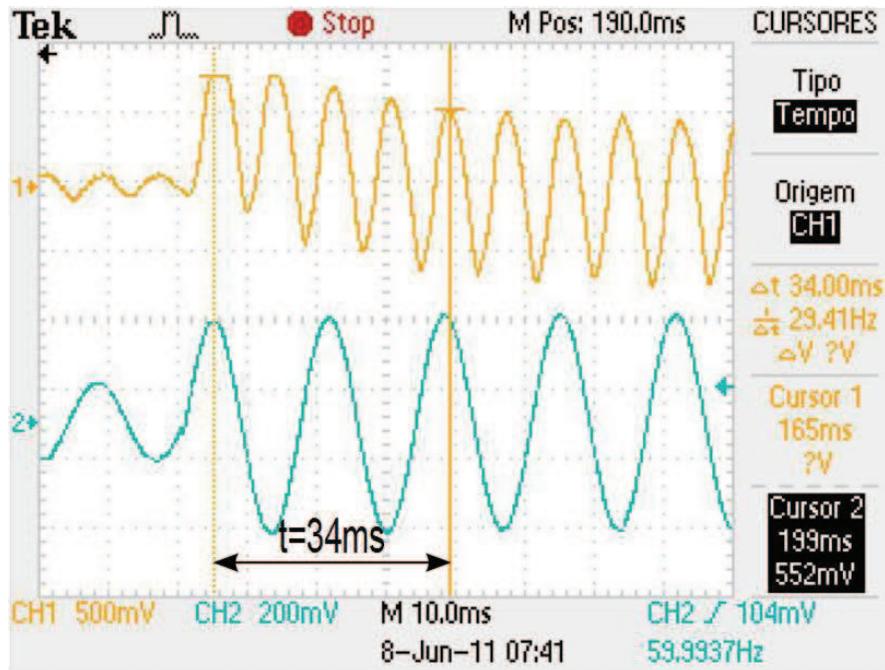


Figura 5.9 - Resposta a transiente do Transdutor de Corrente [20].

Como podemos observar, após a aplicação do transiente, ocorre um “overshoot” na saída do sensor. O sinal de saída leva menos de 34 ms para se estabilizar e alcançar o novo estado de equilíbrio (menos de dois ciclos dos 60 Hz da rede). Vemos na figura 5.9 a saída do interrogador no sinal superior e a entrada de sinal de corrente no inferior. Este comportamento, é mais do que 30% mais rápido do que os valores obtidos em outros transdutores baseados em Terfenol-D [20], indicando que tanto o desing da peça mecânica quanto a velocidade da técnica de interrogação foram importantes para alcançar tal desempenho.

### 5.3 - SENSORES DE TEMPERATURA

Uma das possíveis aplicações para o sistema de interrogação desenvolvido neste trabalho é a medida de temperatura. Nesta aplicação não existe tensão mecânica, alias é necessário evitá-la deixando-se o trecho da fibra que possui a FBG livre de tensões mecânicas para não se misturar a tensão mecânica com a grandeza desejada, a temperatura.

A figura 5.10 foi levantada no laboratório utilizando-se um OSA (Optical Spectrum Analyzer) com uma variação da temperatura na FBG, para confirmar que o comprimento de onda refletido pela FBG varia linearmente com a alteração da temperatura da FBG na fibra óptica.

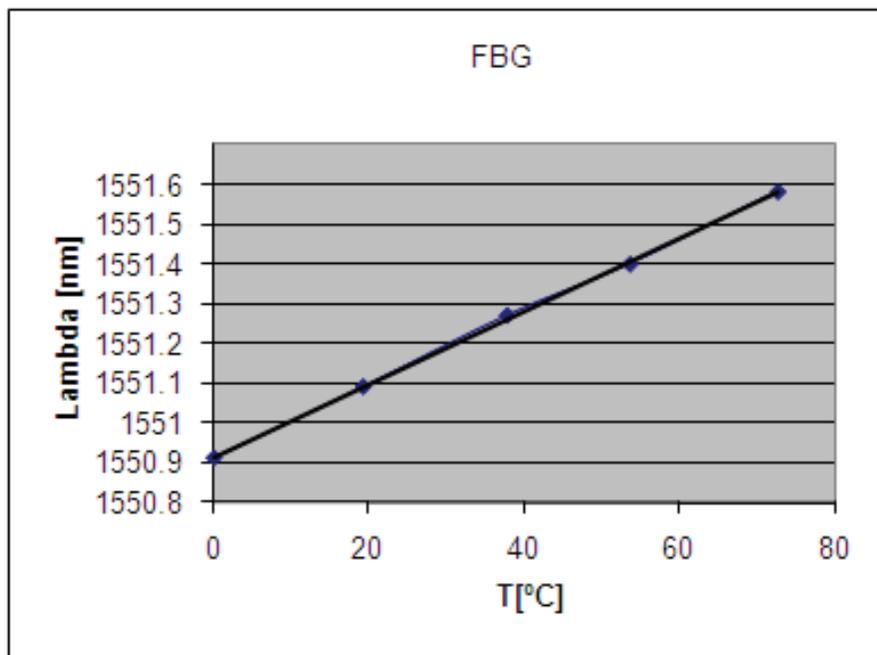


Figura 5.10- Variação do Comprimento de Onda com a Temperatura.

A partir dessa linearidade da FBG em relação à temperatura pode-se desenvolver um sistema de medida indireta de temperatura, usando-se o termistor interno do dispositivo Laser. Na figura 5.9 temos um diagrama de blocos simplificado do sistema proposto.

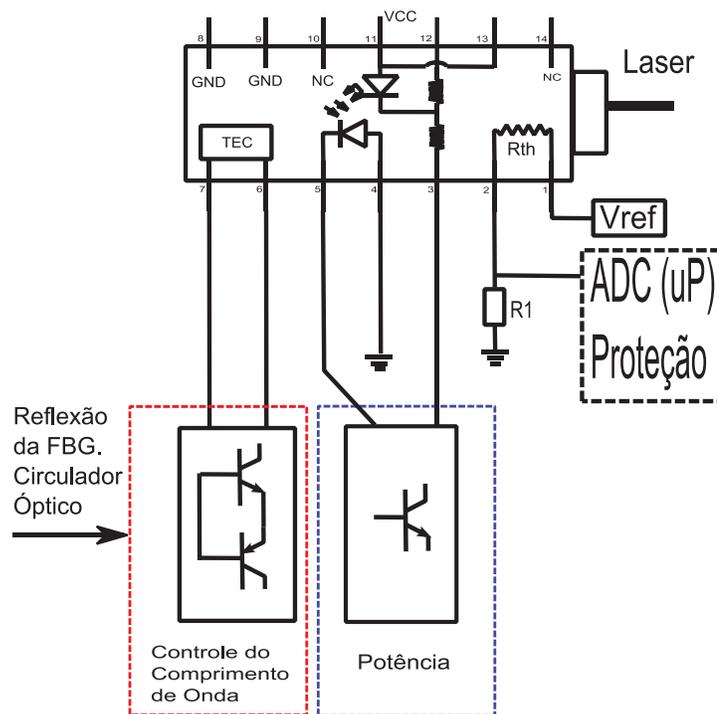


Figura 5.11 – Diagrama de Blocos destacando a linearização do Termistor.

Todos os circuitos eletrônicos desenvolvidos para o sistema de interrogação são utilizados nesta aplicação, a menos do amplificador de transimpedância AC.

O Termistor tem a dupla função: de servir de referência para a proteção do dispositivo Laser como foi mencionado anteriormente no capítulo 4, e para a medida da temperatura da FBG,

Na função de medida de temperatura o microprocessador obtém a tensão  $V_{th}$  para utilizá-la no cálculo da temperatura da FBG. O termistor está ligado a uma referência de tensão

que deve ser extremamente confiável porque qualquer variação nessa tensão alterará a interpretação dos valores medidos. Foi escolhida a para o sistema a fonte de referência de bandgap AD780 [21], que é extremamente estável, já que varia apenas 3 ppm/°C.

Através de ensaios em câmaras térmicas é possível determinar as grandezas necessárias para caracterizar um termistor ( $\beta$  e  $R_0$ ) e depois usa-las nas equações abaixo 11 e 12, que possibilitam a obtenção da temperatura da FBG em campo.

$$R_{th} = R_0 \cdot e^{\beta \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (11)$$

$$V_{th} = \frac{5110 \cdot (2,5)}{R_{th} + 5110} \quad (12)$$

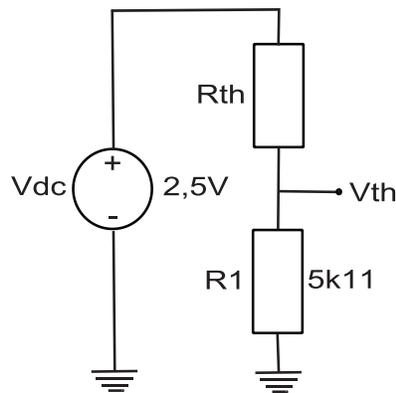


Figura 5.12 - Divisor Resistivo para Linearizar a curva do Termistor.

A tensão da figura 5.12 é da referência de bandgap, que pode produzir 2,5 ou 3,0 V (selecionados externamente ao CI). Os dados apresentados em Silva [19] mostram que o resistor de 5,11 k $\Omega$  é o que melhor lineariza a tensão  $V_{th}$  em função da temperatura.

Temos que destacar a estabilidade que o sistema do interrogador tem no ponto de operação observando o erro das medidas deste sistema comparadas com as efetuadas em paralelo com um termopar. Na dissertação de mestrado de Costa [17] existem maiores detalhes da técnica de determinação da temperatura, onde se pode mostrar que é possível obter uma resolução de 0,5m°C.

Lembrando que o maior valor de  $\Delta\lambda$  do laser utilizado 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.

## 6 – CONCLUSÕES

Neste trabalho desenvolvemos uma nova técnica para interrogação de sensores com grade de Bragg (FBG) em fibras ópticas. A técnica desenvolvida utiliza um sistema em malha fechada que, além de manter o ponto de operação da grade de Bragg estável para variações de temperatura, permite a interrogação AC e DC simultaneamente. Dessa forma é possível interrogar um sensor com FBG que esteja submetido a um sinal de deformação AC e ao mesmo tempo obter a temperatura no ponto onde a FBG está localizada.

O interrogador desenvolvido é bastante simples e de custo relativamente baixo quando comparado às outras técnicas de interrogação disponíveis na literatura, já que necessita de poucos componentes ópticos: um laser DFB, um acoplador óptico (ou um circulador óptico) e um fotodiodo. Os componentes eletrônicos necessários para a implementação dos circuitos eletrônicos do interrogador são de baixo custo e representam uma pequena parcela (cerca de 10%) do custo total do sistema de interrogação.

A técnica desenvolvida permite uma separação total na medida das grandezas em foco, que são o sinal AC de deformação mecânica e a temperatura, usando apenas uma FBG, fabricada com tecnologia convencional, enquanto que os outros sistemas existentes requerem FBGs especiais ou sistemas de detecção sofisticados e de alto custo.

O interrogador desenvolvido foi utilizado, com grande sucesso, em três aplicações de sensores com FBG. Um deles não utiliza a interrogação AC, sendo adequado para medida de temperatura. A resolução obtida em testes em laboratório do sensor de temperatura indicam que é possível conseguir uma resolução de 0,5 m°C.

As outras duas aplicações usaram a capacidade de medição AC do sistema sem que as variações de temperatura no sensor influenciem o desempenho do sistema de interrogação. Uma das aplicações foi para realização de um sensor de alta tensão (que opera através da me-

dida da deformação causada pelo campo elétrico em uma FBG colada a um cristal piezoelétrico). A outra aplicação foi no desenvolvimento de um sensor de corrente RMS que usa um toroide de material magnetoestrutivo para gerar a deformação na FBG.

Concluimos que a técnica de interrogação em malha fechada é uma ferramenta de grande utilidade para sensores baseados em FBG grades em fibras ópticas por proporcionarem não apenas um excelente desempenho como também por oferecerem alternativas de baixo custo, simples de serem fabricadas.

Com base neste trabalho, novas técnicas de interrogação em malha fechada estão sendo desenvolvidas no DEMIC/FEEC, usando lasers de banda estreita e lasers de banda larga, com o intuito de aplicar a técnica de malha fechada em multisensores gravados na mesma fibra óptica.

A altíssima resolução obtida na medida de temperatura ( $0,5 \text{ m}^\circ\text{C}$ ) incentivou uma investigação do uso da técnica desenvolvida em aplicações médicas, especialmente no tratamento térmico localizado para destruição (ou diminuição) de células cancerosas, onde medidas de temperatura com altíssima resolução ( $10 \text{ m}^\circ\text{C}$ ) dentro de uma pequena faixa (entre  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $45 \text{ }^\circ\text{C}$ ) são necessárias. A técnica desenvolvida é totalmente adequada a esta aplicação, e o sensor é extremamente pequeno (uma FBG tem, tipicamente, 3 mm de comprimento), como requer a aplicação.

Por não ter alta complexidade, o sistema eletrônico é possível de ser completamente integrado, de forma que um “system-on-chip” (SoC) poderia ser realizado contendo toda a parte analógica e a parte digital do interrogador. Isso permitiria obter um interrogador de alto desempenho de baixo custo, com dimensões extremamente reduzidas. Com o desenvolvimento de um SoC com toda a parte eletrônica, é possível vislumbrar a fabricação de um interrogador completo em um empacotamento com dimensões semelhantes às de um telefone celular.

## 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

1. Ferreira L. A., Diatzikis E. V., Santos J. L., Farahi F., “Demodulation of fiber Bragg grating sensors based on dynamic tuning of a multimode laser diode” *Applied Optics*, 22, 4751 (1999).
2. Leite, R. L.: “Uma contribuição ao estudo e desenvolvimento de sensores de alta tensão baseados em fibras ópticas”. Tese de doutorado, Unicamp, Outubro de 2006.
3. Yanliang D., Jianzhi L., Chenxi L., “A Novel Fiber Bragg Grating Temperature Compensated Strain Sensor”, *IEEE Computer Society*, 569 (2008).
4. Xu M. G., Dong L., Reekie L., Tucknott J.A. e Cruz J. L., “Temperature-independent strain sensor using a chirped Bragg grating in a tapered optical fiber”, *electronic letters* 10, 823 (1995)
5. Shu X., Zhao D., Liu Y., Gwandu B., Floreani F., Zhang L., Bennion I., “P2-45: Effectively Simultaneous Temperature and Strain Measurement Utilising a Dual-grating Sensor Formed by Type IA and Type IIA FBGs”, *IEEE*, 1740 (2002)
6. Optical Spectrum Analyzer- <http://tmi.yokogawa.com/discontinued-products/optical-measuring-instruments/optical-spectrum-analyzer/aq6331-portable-optical-spectrum-analyzer/>
7. Frazão O., Silva S. F. O., Guerreiro A., Santos J. L., Ferreira L. A. e Araújo F. M., “Strain sensitivity control of fiber Bragg grating structures with fused tapers”, *Applied Optics* 36, 8578 (2007).
8. Y. Zhu, H. Mei, T. Zhu, J. Zhang, e S. Yin, "Dual-wavelength FBG inscribed by femto-second laser for simultaneous measurement of high temperature and strain," *Chin. Opt. Lett.* **7**, 675 (2009).
9. Rong Q., Qiao X. G., Guan T., Wang R., Zhang J., Hu M., Feng Z., Yin Y., and Ma Y., "Temperature-calibrated fiber-optic refractometer based on a compact FBG-SMS structure," *Chin. Opt. Lett.* **10**, 030604 (2012).
10. Lissak B., Arie A. e Tur M., “Highly sensitive dynamic strain measurements by locking lasers to fiber Bragg gratings”, *Optics Letters* 24, 1930 (1998).

11. Chiang Y., Wang L., Chen H., Yang C., Liu W., "Multipoint temperature-independent fiber-Bragg-grating strain sensing system employing an optical-power-detection scheme", *Applied Optics* 9, 1661 (2002).
12. Optical Test Equipment (OSA), [http://www.testequipmentconnection.com/6141/Advantest\\_Q82216.php](http://www.testequipmentconnection.com/6141/Advantest_Q82216.php)
13. Kersey A. D., Berkoff T. A. e Morey W. W., "Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter.", *Optics Letters* 16, 1370 (1993).
14. Eudyna Devices USA, "1,550nm DFB DWDM Direct Modulation Laser FLD5F6CX-E Data Sheet," Eudyna Devices USA, Inc. 2004.
15. Efeito Peltier, [http://www.mspc.eng.br/eletn/peltier\\_110.shtml](http://www.mspc.eng.br/eletn/peltier_110.shtml), Acesso em: 10 Ago 2011.
16. Texas Instruments, "Burr-Brown OPA177 Precision Operational Amplifier Data Sheet, <http://www.ti.com>
17. Costa, E. F. "Nova técnica eletrônica para medida de temperatura com resolução de 0,5m°C usando sensores de fibras ópticas com grades de bragg." UNICAMP. Campinas, SP. 2009.
18. Dias, P. C., Trabalho de iniciação científica. Technical report, 2009.
19. Silva, R. G. R., "Uma nova técnica para interrogação de sensores à fibra ótica com grades de Bragg" Unicamp Campinas, SP: 2009.
20. Cremonezi, A. O. "Projeto de Transdutor de Corrente Elétrica para Alta Tensão com nova abordagem de detecção magnetostriativa e sensoriamento óptico, utilizando Terfenol-D e grade de Bragg em fibra óptica." UNICAMP. Campinas, SP. 2011.
21. High Precision Reference; Analog Devices [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD780.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD780.pdf)
22. Dias, J. A. S.; LEITE, R. L.; FERREIRA, E. C. Electronic technique for temperatura compensation of fibre Bragg gratings sensors. *ELSEVIER, International Journal AEU of Electronics and Communications*, 2008. 72-76.

23. Kersey, A. D.; Davis, M. A.; Patrick, H. J.; LeBlanc, M.; Koo, K. P.; Askins, C. G.; Putnam, M. A.; Friebele, E. J.: "Fiber grating sensors". *IEEE J. Lightwave Techn.*—15(1998), 1442–1463.
24. Morey, W. W.; Meltz, G.; Glenn, W. H.: "Fiber bragg grating sensors". *Fiber Optic & Laser Sensors VII, Proc. SPIE*—1169 (1989), 98.
25. Pires, F. M.; Marques, R.; Curado, P. J. P.; Paradisi, A P.; Ayres, J. B.; Borin, F.; Leite, R. L.; Dini, D. C.; Hortêncio, C. A.; Nalin, F.E.: "Sensor de alta tensão à fibra óptica". XVII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, Belo Horizonte, Brasil, 2006. 1/9–9/9.
26. Cazo, R. M. et al. Sensor de deformação usando grades de bragg. *Revista Científica Periódica - Telecomunicações*, v. III, n. 1, p. 76-79, Dezembro 2000. ISSN 1516-2338.
27. Debashis, S.; MOORE, J. A.; G. ENNIS, M. Design of a Terfenol-D based fiber-optic current transducer. *IEEE Sensors Journal*, v. V, n. 5, p. 1057-1065, October 2005. ISSN 1530-437X.
28. Kersey ALAN, D. Optical sensor system utilizing bragg grating sensors. US Patent Nr: WO98/00740, 8 Jan 1998.
29. Pérez-Millán, P. et al. A fiber-optic current sensor with frequency-codified output for high-voltage systems. *IEEE Photonics Technology Letters*, v. XIV, n. 9, p. 1339-1341, September 2002. ISSN 1041-1135.
30. Lee, B. Review of the present status of optical fiber sensors. *Optical Fiber Technology*, v. I, n. I, p. 57-79, September 2003.
31. Lierhr, S. Optical measurement of currents in power converters. Royal Institute of Technology. Stockholm. 2006.
32. Othonos, A.; KALLI, K. *Fiber Bragg Gratings - Fundamentals and applications in Telecommunications and Sensing*. I. ed. Norwood, MA: Artech House, v. I, 1999.
33. Koste, G. P. et al. System and method for current sensing. US Patent Nr: 2008/0042636 A1, 21 Feb 2008.

34. National Instruments. Fundamentals of FBG Optical Sensing. National Instruments, 2011. Disponível em: <<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/11821>>. Acesso em: 16 Julho 2011.
35. Feisel, L. D. The Electrical Engineering Handbook, Section V - Electrical Effects and Devices. I. ed. New York: CRC Press LLC, v. I, 2000.
36. ETREMA PRODUCTS INC. Terfenol-D datasheet. Etrema Products, 31 Março 2011. Disponível em: <<http://www.etrema-usa.com/documents/Terfenol.pdf>>. Acesso em: 31 Março 2011.
37. Engdahl G., E. Handbook of Giant Magnetostrictive Materials. New York: Academic, 2000.
38. National Instruments. NI USB-6008/6009 OEM device. National Instruments, 2011. Disponível em: <<http://www.ni.com/pdf/manuals/371728b.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2011.
39. National Instruments. <http://www.ni.com/labview/>. Labview, 2011. Disponível em: <<http://www.ni.com/labview/>>. Acesso em: 25 May 2011.
40. Quintero, S. M. M. et al. A magnetostrictive composite-fiber bragg grating sensor. Sensors, v. I, n. 1, p. 8119-8128, November 2010. ISSN 1424-8220.
41. Kovanko, T. E. et al. Current Sensor. US Patent Nr: 2005/0134253 A1, 23 Jun 2005.
42. Bosselman, T. Electric and magnetic field sensing for high voltage applications. Proc. SPIE, v. 3099, p. 305-316, 1997
43. Zhang, X. et al. Experimental investigation on optical spectral deformation of embedded FBG sensors. ITF Laboratories. Montreal, Quebec, Canada. 2007.
44. K. B. ROCHFORD, A. H. R. A. G. W. D. Magneto-optic sensors based on iron garnets. IEEE Trans. Magn., v. 32, n. 5, p. 4113-4117, Sep 1996.
45. B., B. Terfenol and Galfernols: Smart magnetostrictive metals for intelligent transduction. India Institute of Technology Kanpur, v. II, n. 2, July 2005.
46. National Semiconductor Corporation, "Design Considerations for a Transimpedance Amplifier," National Semiconductor Application Note 1803, 2008.

47. GPD Optoelectronics Corp., "High Speed InGaAs Photodiodes GAP60 GAP60CS GAP75 GAP100 GAP300 Data Sheet," <http://www.gpdir.com>
48. National Instruments, "NI USB-6008/6009 OEM device, National Instruments, 2011, <http://www.ni.com/pdf/manuals/371728b.pdf>.
49. National Semiconductors, "High-Performance 68W Audio Power Amplifier with Mute - LM3886 data sheet," <http://www.national.com>
50. Analog Devices, Inc., "2-Terminal IC Temperature Transducer - AD590," AD 590 Data Sheet, <http://www.analog.com>.
51. H. Jiang, F. Chen, C. ZH, and Z. L, "Application of high-precision temperature-controlled FBG filter and light source self-calibration technique in the BOTDR sensor system," *Chin. Opt. Lett.* **10**, 072901 (2012).
52. J. Mora, L. Martinez-Leon, A. Diez, J. L. Cruz, and M. V. Andres, "Simultaneous temperature and ac-current measurements for high voltage lines using fiber Bragg gratings," *Sensors and Actuators A.* **2**, 313 (2006).
53. C. T. Law, K. Bhattarai, and D. C. Yu, "Fiber-Optics-Based Fault Detection in Power Systems," *IEEE Transaction on Power Systems.* **23**, 1271 (2008).
54. D. Zhao, X. Shu, and L. Y. Zhang, "Fiber Bragg grating sensor interrogation using chirped fiber grating based Sagnac loop," *IEEE Sensors J.* **3**, 734 (2003).