

Rafael Guilherme Rocha e Silva

Uma Nova Técnica para Interrogação de Sensores à Fibra Ótica com Grades de Bragg

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

Orientador: Prof. Dr. Elnatan Chagas Ferreira

Campinas, SP
2009

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

Si38n Silva, Rafael Guilherme Rocha e
 Uma nova técnica para interrogação de sensores
 à fibra ótica com grades de Bragg / Rafael Guilherme Rocha e Silva.
 –Campinas, SP: [s.n.], 2009.

Orientador: Elnatan Chagas Ferreira.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação.

1. Detectores óticos. 2. Eletrônica - Instrumentos digitais.
3. Optoeletrônica. 4. Microeletrônica. 5. Eletrônica.
I. Ferreira, Elnatan Chagas. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III.
Título.

Título em Inglês:	A new technique for interrogating fiber optic sensors with Bragg gratings
Área de concentração:	Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica.
Titulação:	Mestre em Engenharia Elétrica
Banca Examinadora:	José Antonio Siqueira Dias, Rogério Lara Leite.
Data da defesa:	17/12/2009
Programa de Pós Graduação:	Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidato: Rafael Guilherme Rocha e Silva

Data da Defesa: 17 de dezembro de 2009

Título da Tese: "Uma Nova Técnica para Interrogação de Sensores à Fibra Ótica com Grades de Bragg"

Prof. Dr. Elnatan Chagas Ferreira (Presidente):

Dr. Rogério Lara Leite:

Prof. Dr. José Antonio Siqueira Dias:

Resumo

Os recentes avanços em circuitos eletrônicos e em fibras óticas proporcionaram o desenvolvimento de sensores baseados em fibras óticas, com uma grande ênfase em sensores com Grades de Bragg (FGB). Os sensores com grade de Bragg são utilizados para quantificar e medir vários parâmetros como: temperatura, pressão, tensão, corrente elétrica e termodinâmica, com grande precisão e resolução. Neste contexto, foi desenvolvido um nova técnica de baixo custo para interrogar um sensor com grade de Bragg e medir temperatura. O sensor FBG é iluminado com um laser DFB, que contém um peltier (Thermo Electrical Cooler - TEC) e um termistor. Um circuito eletrônico analógico controlado por um microcontrolador de alto desempenho (100 MIPS) varia o TEC com correntes controladas, alterando a temperatura do laser DFB e, conseqüentemente, modifica o comprimento de onda em sua saída. Esta simples técnica de baixo custo e boa precisão é capaz de detectar a grade de Bragg no espectro da fibra e calcular de forma indireta a temperatura no ponto.

Palavras-chave: Sensor óptico de temperatura, Grade de Bragg, Sensores ópticos, Instrumentação Eletrônica.

Abstract

The recent advances in fiber optics and electronic circuits has led to the development of many sensors based on fiber optics, with a great emphasis on Fiber Bragg Gratings (FGB) sensors. The FGBs sensors are used to quantify several measurands, as temperature, pressure, tension, thermodynamics and electrical current, with good accuracy and resolution. In this project, a novel low cost technique for interrogating a temperature FBG sensor was developed. The FBG sensor is illuminated with a DFB laser which contains a Thermo Electrical Cooler (TEC) and a thermistor. An electronic analog circuit controlled by a high-performance 100 MIPS 8051CF120 microcontroller drives the TEC with a controlled current, changing the temperature of the DFB laser and, consequently, changing the wavelength in its output. The FBG temperature measurement is implemented with an algorithm stored in the microcontroller flash memory. When the temperature changes in the FBG, the system has to continuously track the FBG as it moves around the spectrum due to the temperature variations. This novel simple low-cost and good precision technique for making an all electronic interrogator for measuring temperature with FBGs sensors was developed. The unique characteristic of associating the Bragg shifts with thermistor measured values is the main feature of the proposed interrogation scheme.

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

Agradecimentos

Aos meus pais José Tadeu da Silva e Maria Assunção Rocha e Silva, pela dedicação e o carinho que sempre tiveram comigo. As minhas irmãs Anna Flávia e Rosanna, pela amizade e pelo amor que sinto por elas. Ao novo membro da família Bob pela amizade e respeito.

Ao professor Dr. Elnatan Chagas Ferreira, pela orientação, pela credibilidade dada ao meu trabalho e pela amizade construída durante o mestrado.

Ao professor Dr. José Antônio Siqueira Dias, pela orientação, pelas conversas e amizade.

Aos meus amigos Wellington Roque, Felipe Pfrimer, Rodrigo Watanabe, Lídia Galdino, Marcela Koyama, Anderson Rossi, Anderson Splenger, Paulo Soares, Indayara Martins, Alcino Biazon, Alex, Davi, Luís Duarte, Eduardo, Nestor, Pedro Dias, Ester e Hugo Bertone.

À Joelma, pela ajuda e o incentivo que me motivaram a realizar o mestrado.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudo.

À Unicamp e FEEC pela oportunidade de realização do curso.

Dedico esta obra a meus pais José Tadeu da Silva e Maria Assunção Rocha e Silva

Sumário

Lista de Figuras	ix
1 Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Motivações	2
1.3 Objetivos	2
1.4 Metodologia	3
1.4.1 Tipo de Pesquisa	3
1.4.2 Procedimentos Metodológicos	3
1.5 Estrutura da dissertação	3
2 Referencial Teórico	5
2.1 Sensores à Fibra Ótica	5
2.2 Sensores com Grade de Bragg em Fibra Ótica	6
2.3 Sensores à Fibra Ótica no Mercado	9
3 Desenvolvimento	11
3.1 Análise de Requisitos	11
3.2 Modelo de Domínio	12
3.3 Diagramas de Casos de Uso	14
3.3.1 Modelo de Caso de Uso Controle do Laser	14
3.3.2 Modelo de Caso de Uso Algoritmo para determinar melhor Resistor em série com o termistor	18
3.3.3 Caso de Uso Sensor de Temperatura SPI	20
3.3.4 Modelo de Caso de Uso Algoritmo de Busca	21
3.3.5 Modelo de Caso de Uso Interface Labview para Monitorar Temperatura	24
3.4 Diagramas de Robustez	27
3.5 Diagramas de Sequência	27

3.6	Diagramas de Classe	28
4	Resultados e Discussões	31
4.1	Sistema Emulador da Grade	31
4.2	Montagem e Funcionamento do Sistema	32
4.3	Busca pela Grade de Bragg	35
4.4	Análise dos Resultados	36
5	Conclusões	41
5.1	Trabalhos futuros	42
	Referências bibliográficas	43
A	Apêndices	45

Lista de Figuras

2.1	Princípio de operação de um sistema de sensoriamento distribuído utilizando uma rede ótica com grades de Bragg ao longo da Fibra[1].	6
2.2	Sensor óptico utilizando grade de Bragg em fibra medindo um parâmetro localizado em um ponto A[1].	7
2.3	Gravação de uma grade de Bragg em uma fibra ótica[2].	8
2.4	Esquema do deslocamento espectral de uma rede de Bragg submetida a tração e compressão[3].	8
2.5	Esquema do princípio de operação de uma rede de Bragg em fibra ótica. Uma faixa estreita do espectro de luz, centrada no comprimento de onda de Bragg(B) é refletida, e o restante do espectro é transmitido[3].	9
2.6	Distribuição dos trabalhos apresentados OFS 2005 de acordo com: a) grandeza medida; b) com a tecnologia aplicada[3].	10
3.1	Visão Macro do <i>Iconix</i>	13
3.2	Modelo de Domínio	13
3.3	Diagrama esquemático do circuito de driver do laser	14
3.4	Grade de Bragg utilizada	15
3.5	Modelo de Caso de Uso do circuito do driver do laser	15
3.6	Diagrama de blocos do sistema de busca da grade de Bragg	16
3.7	Hardware utilizado	17
3.8	Modelo de Caso de Uso para o melhor resistor.	18
3.9	Tensão de saída sobre o termistor em função da temperatura para o sistema utilizando o resistor ótimo de linearização.	19
3.10	Erro de linearidade na tensão de saída sobre o termistor em função da temperatura para o sistema utilizando o resistor ótimo de linearização.	19
3.11	Variação do comprimento de onda da grade em relação à temperatura.	20
3.12	Sensor SPI.	21
3.13	Diagrama de Conexão do LM95071.	21

3.14	Modelo de Diagrama de Caso de Uso do algoritmo de busca da Grade de Bragg . . .	22
3.15	Representação Gráfica do funcionamento do Algoritmo	23
3.16	Modelo de Caso de Uso do programa de Labview para aquisição de temperatura . . .	24
3.17	Diagrama de blocos em Labview.	25
3.18	Diagrama de blocos da subVI em Labview.	26
3.19	Representação dos objetos limite/interface, controlador e entidade	27
3.20	Conecta a fase de análise com a fase de design.	27
3.21	Diagrama de Robustez para o Termistor.	28
3.22	Diagrama de Sequência para o Termistor.	28
3.23	Diagrama de Classe do programa Labview	29
3.24	Diagrama de Classe do programa para determinar o melhor resistor	29
3.25	Diagrama de Classe do algoritmo de monitoramento de Temperatura	30
4.1	Emulador da Grade de Bragg[4]	32
4.2	Circuito emulador da Grade de Bragg[4]	32
4.3	Grade encontrada pelo emulador	33
4.4	Amplificador do sinal do D/A[4]	33
4.5	Circuito do amplificador do sinal do D/A[4]	34
4.6	Tela do programa em Labview	35
4.7	Gráfico da variação da grade para várias medidas de temperatura	36
4.8	Erro de escala dos valores calculados da temperatura da FBG	37
4.9	Gráfico Temperatura da Grade(°C) x Temperatura SPI(°C)	38
4.10	Leitura da tensão do termistor(amarelo) e tensão no foto diodo(rosa)	38
4.11	Gráfico Temperatura da Grade(°C) x Temperatura SPI(°C)	39
4.12	Gráfico Temperatura da Grade(°C) x Temperatura SPI(°C)	39
4.13	Gráfico Termistor(mV) x Temperatura SPI(°C)	40

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo apresenta-se uma breve introdução do trabalho, juntamente com as contextualizações, motivações, objetivos e justificativas.

1.1 Contextualização

Com o advento da fibra ótica e circuitos eletrônicos, novas tecnologias proporcionam a criação de técnicas de caracterização de medidas. Desde o surgimento das fibras óticas, elas foram usadas e estudadas exclusivamente em sistemas de comunicações. Com isso pesquisas foram iniciadas visando construir sensores a fibra ótica capazes de medir diferentes parâmetros físicos.

O sensoriamento utilizando fibra ótica está em crescente desenvolvimento, constituindo em um ramo de pesquisa básica e aplicada, bem como gerando um mercado de vários milhões de dólares. Por possuir características como, pequeno tamanho, facilidade de multiplexação, alta capacidade de enviar e receber sinais ópticos em grandes distâncias, baixo custo de produção, a comunicação confiável e imunidade a falhas, a fibra ótica é altamente viável para construção de redes de sensores de baixo custo[5][6].

Sensores a fibra ótica são muito utilizados em ambientes eletricamente ruidosos, pois não sofrem interferência eletromagnética. Os parâmetros sensoreados podem ser transmitidos a longas distâncias devido a imunidade à interferência entre canais. Características estas muito importantes em ambientes onde é necessário um isolamento elétrico como linhas de alta tensão [7].

A fibra ótica possui características que a permite ser manipulada como um sensor, podendo ser utilizada para quantificar parâmetros de temperatura, pressão, tensão, termodinâmica e corrente elétrica[8].

Os sensores à fibra ótica podem ser classificados como de tecnologia de ponta, sendo importante do ponto de vista técnico-científico, podendo ser comprovado pelo vasto número de publicações sobre o assunto. Os países em desenvolvimento estão entrando na competição de produção de sensores, uma

vez que o domínio da tecnologia permitirá grande economia de divisas.

1.2 Motivações

A medida de temperatura é essencial para controle de processos, monitoramento de aeronaves e motores, instrumentação médica e outras áreas. Entre essas incluem-se medidas da temperatura em pontos energizados de transformadores de potência e linhas de transmissão, para as quais os sensores de fibras óticas são bastante apropriados[9].

A manutenção de linhas de transmissão é realizada fundamentando-se em dados estatísticos e inspeções que permitem antever as necessidades de intervenções. Algumas características importantes no monitoramento de redes de alta tensão são listadas: Otimizar o transporte, aproveitar a capacidade máxima das redes atuais, garantir a segurança, aumentar a transferência de potência, superior com as limitações atuais. A energia transmitida pelas redes não está limitada pela seção do condutor, e sim pelo limite térmico que garante uma distância mínima ao solo. Medir a temperatura do condutor permite conhecer esta distância até o solo com maior exatidão[7].

Com o intuito de desenvolver um sensor óptico inteligente que monitore temperatura em locais energizados, de difícil acesso e de alta periculosidade, foi criada uma nova técnica para interrogação de sensores a fibra ótica com grades de Bragg, que realiza aquisições de temperatura na rede de tempo em tempo. O sensor é considerado de baixo custo, pois realiza medidas indiretas de temperatura, sem a necessidade do auxílio de equipamentos caros, como o OSA (Analisador de Espectro Óptico). O monitoramento de uma rede com sensores auxilia na detecção de falhas, aumentSeco da vida de equipamentos e na prevenção manutenível da rede elétrica.

1.3 Objetivos

Neste trabalho foram levantados os aspectos necessários para subsidiar o conhecimento do regime de monitoramento de temperatura, através de um sistema embarcado à fibra ótica, capaz de monitorar a temperatura em locais de alta periculosidade e de difícil acesso.

O sistema proposto realiza medidas da temperatura por meio de um sistema microcontrolado inteligente. O sensor de fibra ótica com grade de Bragg é excitado por um laser DFB que contém um Thermo Electrical Cooler(TEC) e um Termistor. Um circuito analógico controlado por um microcontrolador 8051CF120[10] de alto desempenho (100 MIPS) guia o TEC com correntes controladas, alterando a temperatura do laser DFB e, conseqüentemente, o comprimento de onda em sua saída. O circuito analógico é controlado por um conversor digital/analógico (DAC) de 12 bits encapsulado no microcontrolador. O conversor é unipolar, portanto, foi desenvolvido um amplificador capaz de condicionar a tensão gerada em um sinal de $\pm 8V$.

É possível determinar o ponto no espectro da fibra ótica onde a grade de Bragg se encontra. Determina-se a temperatura no local desejado, armazenando os dados de modo contínuo e gerando um banco de dados para posterior estudo. Um programa em Labview foi construído para mostrar as informações na tela para o usuário.

1.4 Metodologia

1.4.1 Tipo de Pesquisa

Segundo Jung (2004), uma pesquisa que utiliza conhecimentos básicos, tecnologias existentes, conhecimentos tecnológicos e que tenha como objetivo um novo produto do processo é caracterizado como tecnológica. Além destes objetivos, existe também o conhecimento gerado que é resultante do processo de aplicação da pesquisa.

Esta forma de pesquisa é complexa porque exige além do resultado prático final (protótipo), uma série de estudos e experimentos básicos, secundários, oriundos das dificuldades e limitações ocasionadas por inúmeras variáveis decorrentes do próprio processo de pesquisa. A partir destas definições, pode-se classificar este trabalho como sendo de pesquisa tecnológica.

1.4.2 Procedimentos Metodológicos

Com o objetivo de medir temperatura, reduzir o gasto com deslocamento de pessoal, evitar o acesso contínuo a áreas de difícil acesso, foi construída uma nova técnica para interrogação de sensores a fibra ótica para o monitoramento de temperatura em locais ruidosos. A pesquisa foi realizada no período de agosto de 2008 a novembro de 2009.

Inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica sobre o microcontrolador 8051 e linguagem de programação C. Foram consultados livros e manuais disponibilizados na internet e na literatura em modo geral para o estudo sobre fibras óticas com grade de Bragg. Foi desenvolvido um programa em C, capaz de gerir e monitorar todos os dispositivos que fazem leitura da temperatura, alterando a temperatura interna do laser, para busca da grade no espectro da fibra ótica. Um programa em Labview foi construído para o tratamento dos dados recolhidos.

1.5 Estrutura da dissertação

O presente trabalho para monitorar temperatura através de um sistema embarcado à fibra ótica está organizado em cinco capítulos:

No Capítulo 2 são discutidos conceitos básicos sobre grades de Bragg e fibra ótica que foram utilizados para concepção do sistema embarcado.

No Capítulo 3 é apresentado o desenvolvimento do trabalho.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados e discussões acerca do estudo realizado. Esse é fundamentado nos procedimentos realizados para a construção do projeto, os recursos utilizados e a maneira com o qual foram implementados.

Por fim, o Capítulo 5 aborda as conclusões e trabalhos futuros.

Capítulo 2

Referencial Teórico

Detalha-se aqui o funcionamento dos sensores à fibra ótica e sensores com grades de Bragg. Inicialmente é feita uma descrição dos sensores à fibra ótica e uma breve contextualização dos sensores com grades de Bragg, e posteriormente, apresenta-se os sensores disponíveis no mercado. Este capítulo alerta o leitor para o melhor entendimento do assunto e serve de embasamento teórico para a elucidação do capítulo 3.

2.1 Sensores à Fibra Ótica

As técnicas de sensoriamento baseadas em fibras óticas sofreram um avanço significativo a partir da década de 70[7]. Os novos métodos com alta qualidade e baixas perdas em fibras óticas no ramo de telecomunicações, viabilizaram o monitoramento de grandezas a longa distância e a baixo custo.

Comparando sensores à fibra ótica a sistemas convencionais, percebe-se que sistemas a fibra possuem inúmeras vantagens, pois são imunes à interferência eletromagnética, possuem peso reduzido e alta sensibilidade[11]. Algumas pesquisas iniciais revelaram que as fibras óticas poderiam ser usadas para monitorar parâmetros físicos como: força, temperatura e pressão. Atualmente, esses sensores podem ser utilizados para o sensoriamento de grandezas físicas e químicas, tais como: temperatura, umidade, pressão, deformação, aceleração, rotação e concentração química[3].

Os sensores à fibra tem a função de modular de maneira conhecida a luz que a atravessa e é detectada na outra extremidade da mesma. Grande parte dos sensores atuais são baseados na modulação de amplitude da luz, podendo ser realizada direta ou indiretamente quando a fibra é o próprio elemento transdutor, transformando os parâmetros medidos em informação luminosa para o detector[7].

Com apenas uma fonte de luz vários sensores podem ser colocados em uma mesma fibra, utilizando técnicas de multiplexação mostrados nas figuras Fig. 2.1 e Fig. 2.2, realizando leituras de uma grande variedade de sinais. Ao longo de apenas uma fibra ótica pode-se mensurar sinais relacionados a deformação, vibração, temperatura e pressão com grande precisão e estabilidade.

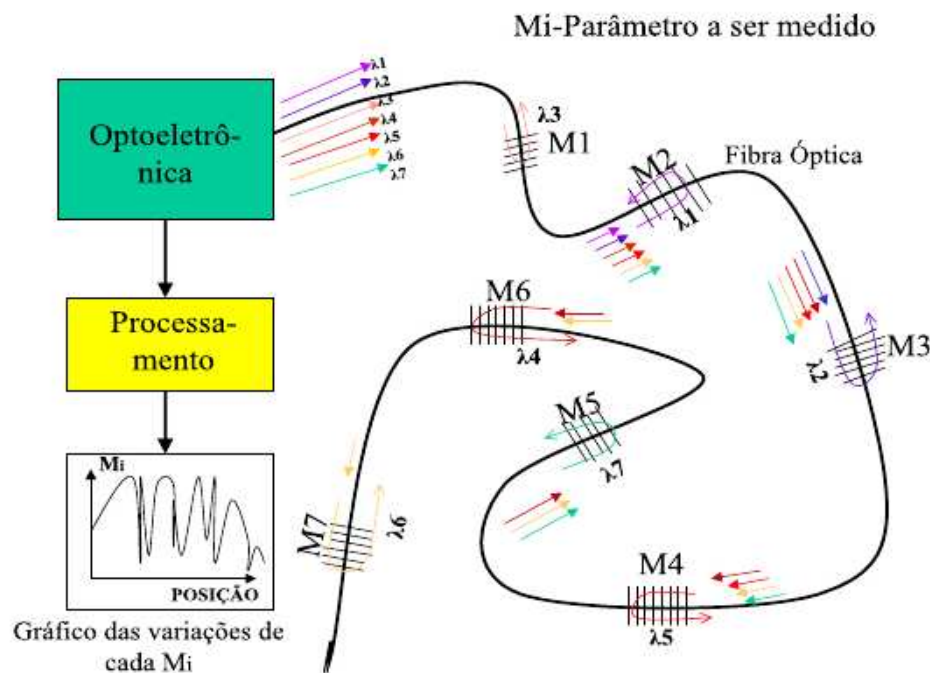


Fig. 2.1: Princípio de operação de um sistema de sensoriamento distribuído utilizando uma rede ótica com grades de Bragg ao longo da Fibra[1].

O grande motivo para o sucesso da utilização de fibras óticas na área de sensoriamento está ligada ao crescente uso de redes com grade de Bragg como elementos sensores. As grades de Bragg são desenvolvidas com radiação ultravioleta e são relativamente de fácil fabricação e baixo custo[12].

2.2 Sensores com Grade de Bragg em Fibra Ótica

As grades de Bragg são estruturas simples presentes no núcleo das fibras óticas e possuem um elevado potencial para serem produzidos em grande escala. Na última década foi crescente o número de investigações científicas na área de optoeletrônica, devido a possibilidade de se fabricar grades de Bragg diretamente no núcleo das fibras através de processos fotolíticos, sem alterar as características óticas e a integridade física da fibra[13].

Com o surgimento das grades de Bragg, observou-se que elas possuem excelentes resultados quando aplicados como sensores de grandezas físicas, estáticas e dinâmicas, tais como temperatura, deformação e pressão. Observa-se uma grande vantagem na utilização desta, pois a informação a ser medida está contida no comprimento de onda refletido. Essa característica torna o sistema auto referenciável, independente de flutuações da luz e imune a perdas causadas ao sensor e a fonte ótica[14].

A grade de Bragg apresenta uma perturbação periódica do índice de refração, alcançando uma

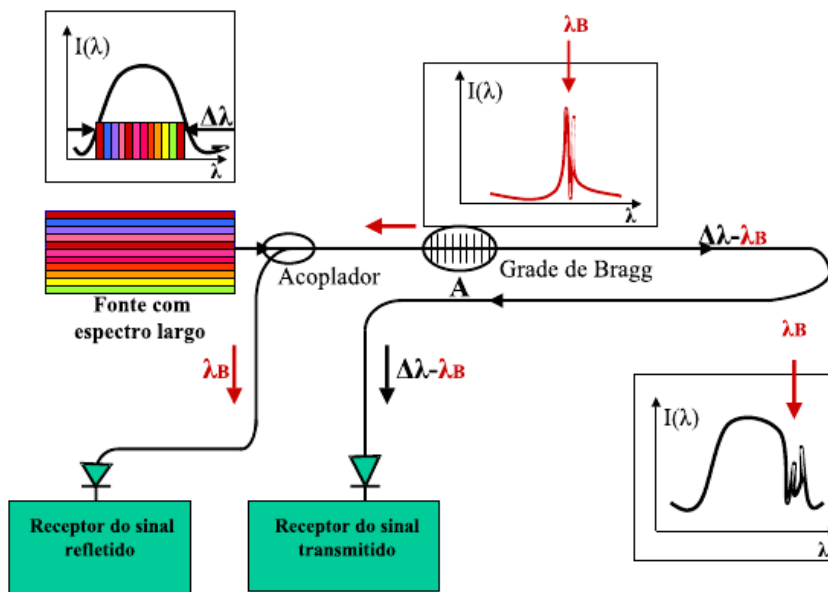


Fig. 2.2: Sensor óptico utilizando grade de Bragg em fibra medindo um parâmetro localizado em um ponto A[1].

alta refletividade no comprimento de onda de ressonância, conhecido como comprimento de onda de Bragg. Este é um dispositivo óptico transparente sendo um tipo de refletor de Bragg distribuído, construído em um pequeno seguimento da fibra que reflete a luz no comprimento de onda de Bragg e transmite o restante. A grade pode ser usada como um filtro óptico em linha bloqueando alguns comprimentos de onda ou até mesmo um comprimento de onda específico. Utiliza-se a grade de Bragg como sensor devido a alta sensibilidade a estímulos externos como, deformação e temperatura[12].

A fabricação de grades em fibras é usualmente realizada através da exposição lateral da fibra ótica dopada à luz ultravioleta, onde a intensidade segue um padrão no eixo axial da fibra. Transcreve-se o padrão da luz ultra violeta na forma de perturbação do índice de refração efetivo do núcleo, conforme mostrado na figura Fig. 2.3[2].

Os efeitos de compressão e tração sobre uma rede de Bragg podem ser observados através da figura Fig. 2.4. A figura mostra a atuação da grade como sensor e pode-se observar o deslocamento no comprimento de onda de Bragg ao ser submetido a tração ou compressão. A tração está relacionada com o aumento na periodicidade espacial da rede de Bragg, apresentando uma variação de comprimento de onda positivo. Ao submeter a rede de Bragg a uma compressão, a periodicidade espacial da rede diminui, consequentemente o comprimento de onda será negativo[3].

Com a variação do comprimento de onda de Bragg pode-se afirmar que as redes de Bragg podem ser utilizadas como sensor de deformação e temperatura, uma vez que se pode observar qualquer deformação ou alteração de temperatura através da variação do comprimento de onda de Bragg. Um

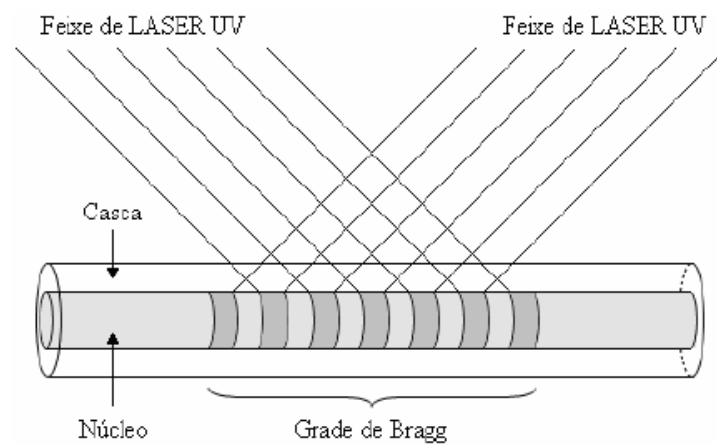
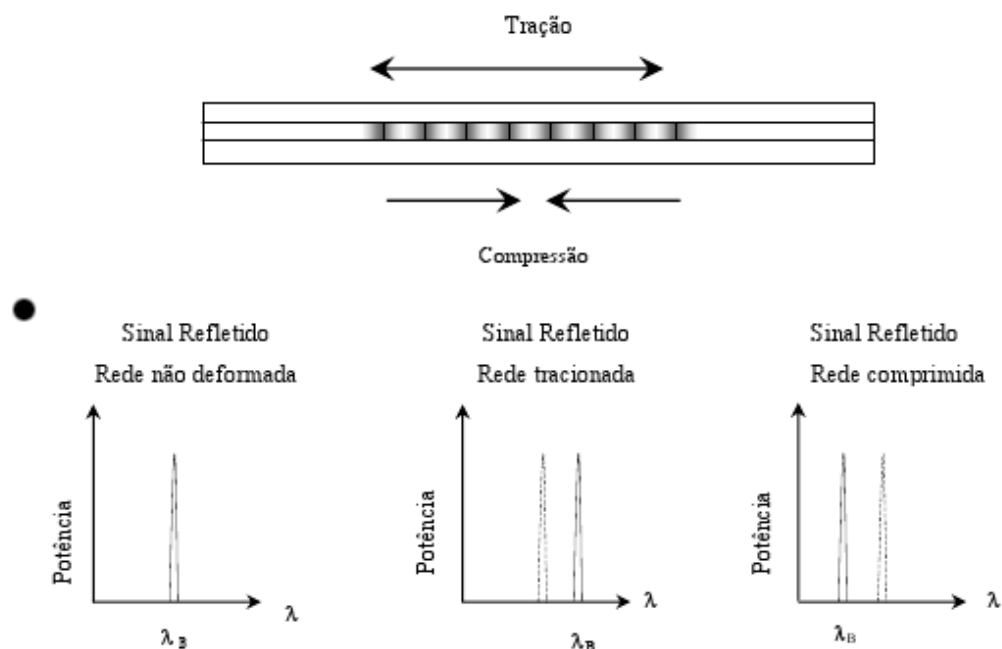


Fig. 2.3: Gravação de uma grade de Bragg em uma fibra ótica[2].



[3]

Fig. 2.4: Esquema do deslocamento espectral de uma rede de Bragg submetida a tração e compressão[3].

sistema de detecção capta a luz refletida pela rede, que mede o comprimento de onda de Bragg. Ao alterar o comprimento de onda é possível correlacionar as variações do parâmetro que está sendo monitorado[3].

A figura Fig. 2.5 mostra uma rede com grade de Bragg iluminada por uma fonte de luz de banda

espectral larga. Uma pequena faixa do espectro da luz centrada no comprimento de Bragg é refletida e o restante é transmitido[3].

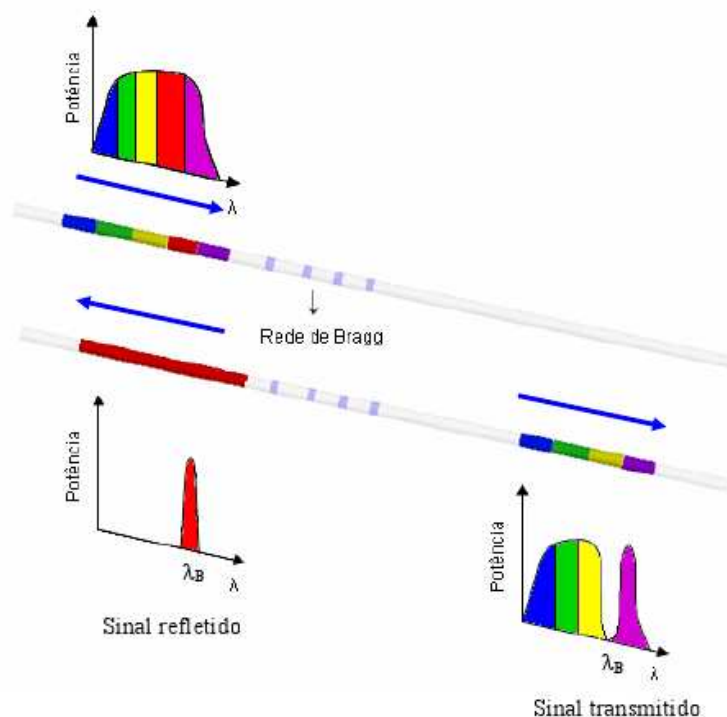


Fig. 2.5: Esquema do princípio de operação de uma rede de Bragg em fibra ótica. Uma faixa estreita do espectro de luz, centrada no comprimento de onda de Bragg(B) é refletida, e o restante do espectro é transmitido[3].

Um dos principais desafios da utilização das grades de Bragg como sensores está relacionada a determinar os deslocamentos no comprimento de onda de Bragg. A principal vantagem é que a informação a ser medida está contida no comprimento de onda, tornando-o independente de flutuações de intensidade da luz. Outra vantagem em se utilizar sensores com grade de Bragg é a possibilidade de se utilizar vários sensores multiplexados ao longo de uma mesma fibra ótica, apresentando uma resposta linear sobre várias ordens de grandeza[12].

2.3 Sensores à Fibra Ótica no Mercado

Com o intuito de demonstrar o estado atual do desenvolvimento de sensores utilizando fibra ótica, a figura Fig. 2.6 apresenta a distribuição de trabalhos apresentados na Conferência de Sensores Baseados em Fibras Óticas realizada em 2005, sendo classificados de acordo com a grandeza medida e tecnologia aplicada na medição[3].

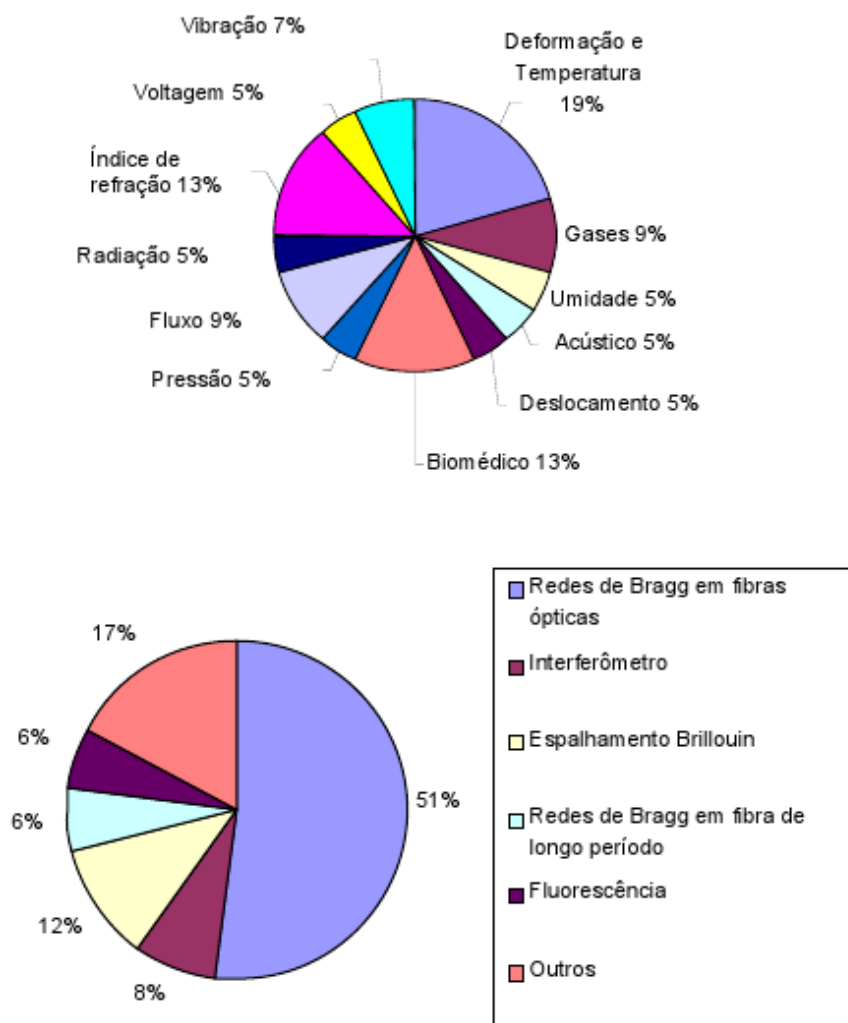


Fig. 2.6: Distribuição dos trabalhos apresentados OFS 2005 de acordo com: a) grandeza medida; b) com a tecnologia aplicada[3].

Com isso surgiu-se a necessidade de construir um sensor de temperatura à fibra ótica de baixo custo que pudesse operar em sistemas ruidosos e de difícil acesso. A medida de temperatura é de grande valia para monitoramento e controle de processos, nos quais incluem medidas de temperatura em linhas de transmissão e pontos energizados de transformadores de potência, onde os sensores de fibras óticas são bastante apropriados.

Nesta seção foram vistas as principais abordagens utilizando sensoriamento com fibras óticas. No próximo capítulo descreve-se o desenvolvimento do projeto e suas características.

Capítulo 3

Desenvolvimento

Este capítulo tem o propósito de apresentar o desenvolvimento do projeto utilizando grades de Bragg para medir temperatura. Nele será descrito como o projeto foi realizado, utilizando linguagem de modelagem UML (Unified Modeling Language). Com ela descreve-se os passos realizados na criação do algoritmo de busca da grade de Bragg, bem como a integração do algoritmo com os circuitos eletrônicos utilizados.

3.1 Análise de Requisitos

As necessidades e os requisitos do sistema foram levantados através da análise de requisitos, com a qual identifica-se as características do sistema para atender as necessidades e as expectativas do projeto.

No presente trabalho foi utilizado uma metodologia de desenvolvimento de software denominada *Iconix*. Esse processo faz uso da linguagem de modelagem UML que auxilia a verificação de que todas as fases da modelagem de requisitos de projeto estão sendo atendidas, sendo mostrados em forma de diagramas as iterações entre os objetos.

Os projetos orientados a objetos, tem como objetivo identificar os melhores conjuntos de objetos para descrever um software. O sistema funciona através do relacionamento e da troca de mensagens entre os objetos. Com a programação orientada a objetos, as classes que definem os objetos presentes no sistemas são implementadas, descrevendo o comportamento (métodos) e seus estados (atributos) dos objetos assim como o relacionamento entre eles[15].

A linguagem UML (Unified Modeling Language) é usada para especificar, documentar, visualizar e desenvolver sistemas orientados a objetos. Esta é considerada uma das linguagens mais expressivas para modelagem de sistemas orientados a objetos, pois sintetiza os principais métodos existentes, facilitando a comunicação entre as equipes durante o processo de desenvolvimento do produto[16].

Em cada fase do desenvolvimento de software é necessário rever os requisitos do projeto em

algum momento. A proposta do ICONIX permite um alto grau de rastreabilidade, aproximando o processo aos requisitos do usuário. Rastreabilidade também significa encontrar novos objetos em cada fase durante o projeto[17].

A partir de um protótipo de um projeto é possível identificar os diagramas de caso de uso baseados nos requisitos dos usuários.

O caso de uso é uma técnica de modelagem utilizada na descrição do que um sistema deve fazer. Nele descreve-se as interações típicas entre usuários e o sistema propriamente dito, especificando um conjunto de exigências que o sistema deve realizar. Através dos casos de uso, constrói-se os diagramas de análise robusta para cada caso de uso[16].

A análise e o projeto de sistemas são interligadas através do modelo de análise robusta. Essa assegura que a descrição dos casos de uso esteja correta e pode-se descobrir novas classes que não foram criadas no modelo de domínio[17].

Com os resultados obtidos, desenvolve-se o diagrama de sequência, finalizando com a construção do modelo completo, representado pelo diagrama de classes. [referencias]

Os diagramas de sequência representam a troca de mensagens (métodos) entre os objetos em uma situação específica ao longo de um tempo. São usados para ordenar os momentos nos quais as mensagens são enviadas para os objetos[16].

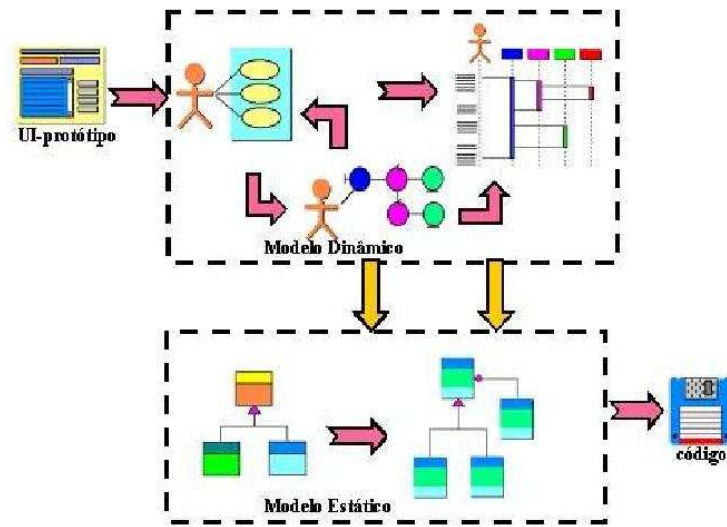
Os diagramas de classe mostram as diferentes classes pertencentes ao sistema e seus relacionamentos. Visualiza-se os métodos e atributos das classes e os relacionamentos estáticos entre elas.

A figura Fig. 3.1 demonstra que o modelo estático é formado pelos Diagramas de Domínio e o Diagrama de Classe. O modelo estático modela o funcionamento do sistema sem nenhum dinamismo e interação do usuário. O Modelo Dinâmico propõe a interação do usuário com o sistema através de ações, onde o sistema apresenta alguma resposta ao usuário em tempo de execução. O modelo estático deverá ser refinado incrementalmente durante as iterações sucessivas do modelo dinâmico. Não exige marcos formais de projeto para o refinamento, isso é feito de forma natural durante o projeto.[iconix]

O *Iconix* é composto pelas seguintes fases, Modelo de Domínio, Modelo de Caso de Uso, Análise Robusta, Diagrama de Sequência e Diagrama de Classe os quais serão mostrados em detalhes nas seções 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6.

3.2 Modelo de Domínio

A leitura e interpretação das informações do sistema é descrita através do modelo de domínio. Esse consiste em descobrir os objetos de um problema do mundo real e suas classes. O modelo de domínio auxilia a criação de cenários, no processo de desenvolvimento de software. O modelo pode não retratar o ambiente completo adequado para o problema em primeira instância, visto que algumas

Fig. 3.1: Visão Macro do *Iconix*

classes, serão excluídas e outras serão encontradas ou modificadas ao longo do desenvolvimento do projeto. Desta forma identifica-se os objetos do sistema e suas relações mostrados na Fig. 3.2.

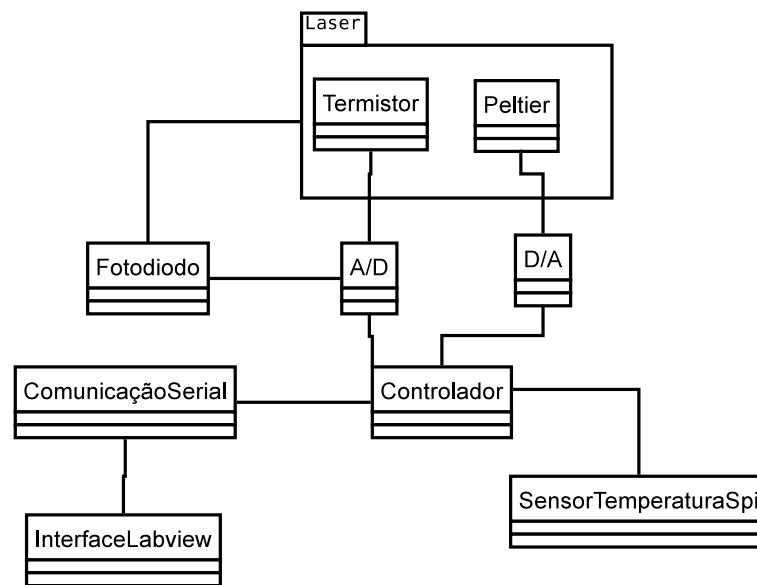


Fig. 3.2: Modelo de Domínio

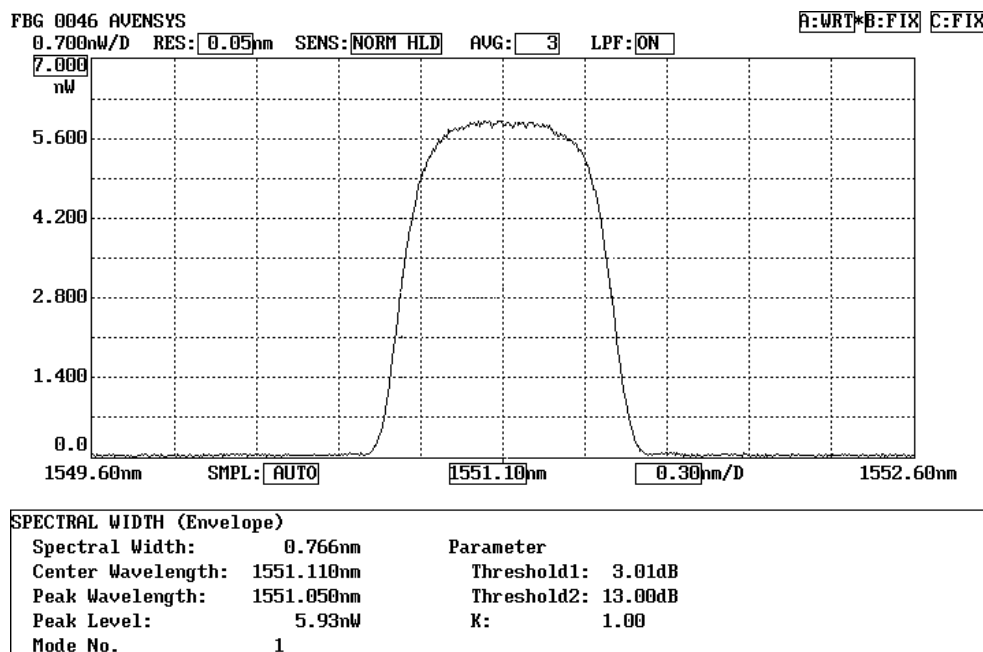


Fig. 3.4: Grade de Bragg utilizada

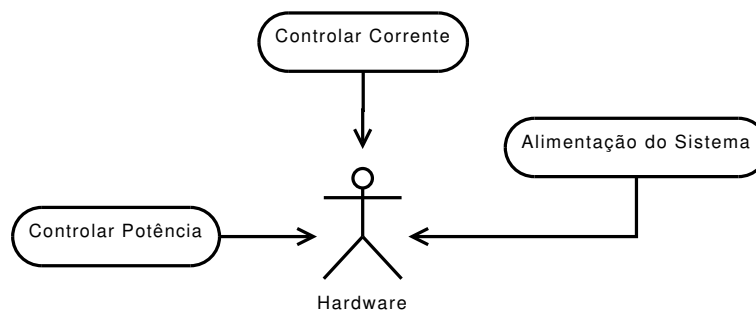


Fig. 3.5: Modelo de Caso de Uso do circuito do driver do laser

A fibra com grade de Bragg é iluminada com um laser DFB contendo um Peltier (*Cooler Termo Elétrico*), um Foto Diodo e um Termistor. O laser permite alterar a temperatura da sua junção através de um dispositivo peltier interno, aquecendo ou esfriando CI através de um pino de controle no encapsulamento. Ao alterarmos o dispositivo peltier, um novo comprimento de onda será gerado na saída do Laser.

No projeto utilizou-se um hardware para controle de alguns dispositivos do laser como: controle de potência, controle de corrente, amplificador de transimpedância (transforma fonte de corrente em tensão), fonte e amplificador de tensão.

O diagrama de blocos do sistema de busca da grade de Bragg proposto é mostrado na Fig. 3.6. Um laser DFB é usado para iluminar o sistema e a célula D1 recebe a luz refletida do sensor FGB1.

A fotocorrente gerada em D1 é convertida em tensão, através de amplificador transimpedância de modo que a tensão de saída é proporcional à intensidade da luz refletida pela grade de Bragg.

O circuito eletrônico do interrogador é composto por um microcontrolador e componentes discretos. Os dois op-amps utilizados atuam como um controlador simples para manter a potência do laser constante durante toda a sua gama de operação.

O conversor D/A presente no microcontrolador é usado para analisar continuamente o DFB variando toda faixa de operação de temperatura do laser (15-35°C), resultando em um δL de cerca de 2 nm do comprimento de onda da saída do laser.

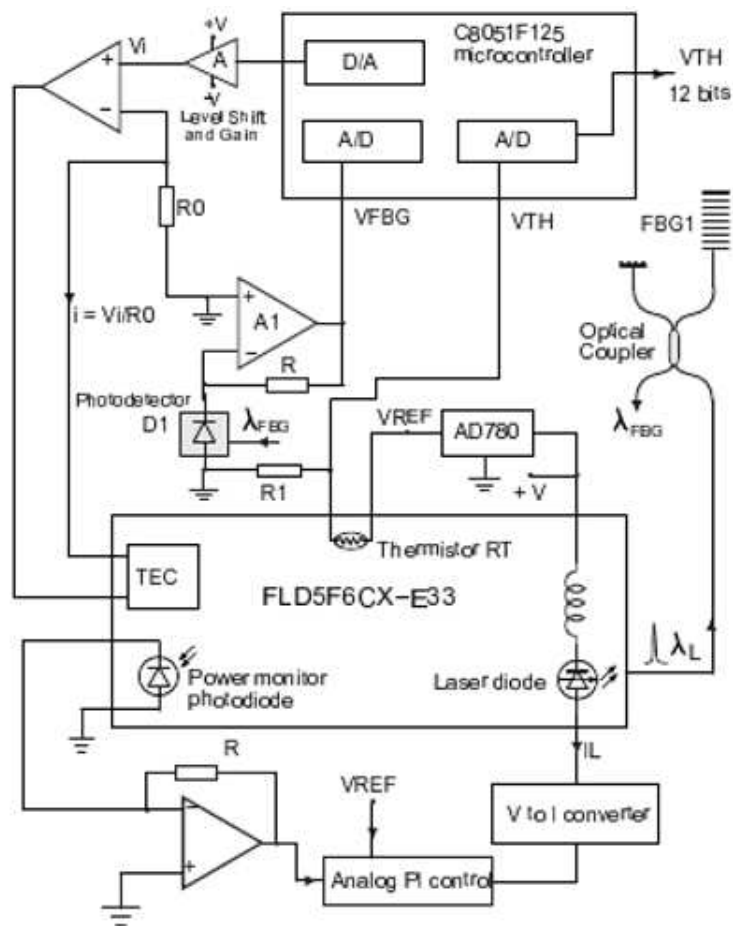


Fig. 3.6: Diagrama de blocos do sistema de busca da grade de Bragg

Um circuito com um fotodiodo será utilizado para realizar a leitura da luz refletida pela grade. O sistema controla a temperatura do laser através do peltier, e conseqüentemente, a intensidade de potência de saída. Através de um fotodiodo existente presente no circuito foi realizada uma busca e monitoramento do ponto onde a grade de bragg se encontra dentro do espectro da fibra ótica.

O sistema de controle de potência do laser tem por objetivo estabilizar o circuito evitando vari-

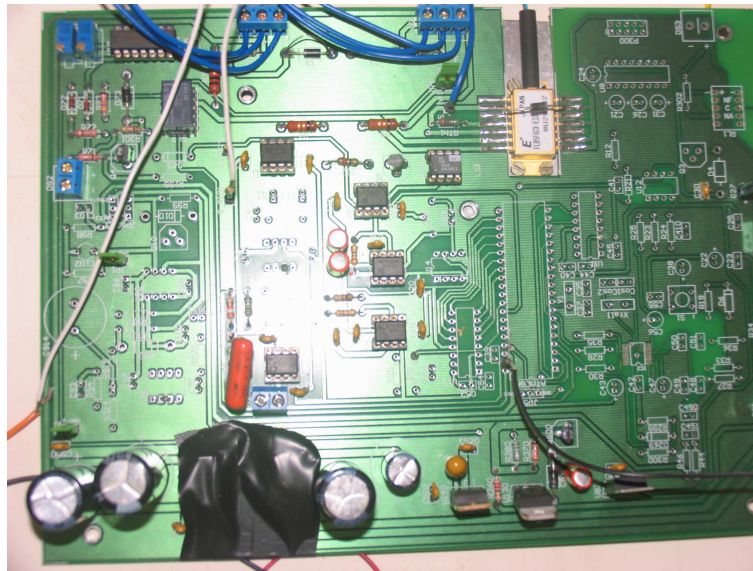


Fig. 3.7: Hardware utilizado

ações de potência na saída do laser, sendo constituído por circuito realimentado cuja a entrada de referência é a potência desejada do laser (1 mW). Essas variações foram analisadas através do dispositivo OSA (Optical Spectral Analyser).

O dispositivo OSA é um equipamento ótico com alto poder de resolução, capaz de distinguir frequências próximas, utilizado para corrigir ou monitorar as variações de comprimento de onda de lasers. Este instrumento espectrométrico detecta radiação em vários canais, ordenando espectralmente desde o ultravioleta até o infra-vermelho, digitalizando a informação e armazenando-a para processamento e análise de canal a canal.

No circuito foi utilizado uma excitação no modo de corrente, pois o controle fica com acionamento mais suave, permitindo maior precisão na definição do comprimento de onda do laser e também no laser semiconductor Eudyna, além de prover maior segurança ao TEC.

Também foi necessária a utilização de um amplificador de transimpedância para converter fonte de corrente proveniente da saída do foto diodo para a entrada do A/D do microcontrolador em forma de tensão e um circuito para amplificar a saída de tensão proveniente do D/A do microcontrolador de 0 a 2,5V para tensões de $\pm 8V$.

O circuito desenvolvido consegue estabilizar o ponto de operação do laser no ponto desejado da grade de Bragg, mesmo quando essa, está sujeita a grandes variações de temperatura.

Com isso pode-se realizar um circuito que controle a temperatura do CI do laser precisamente.

3.3.2 Modelo de Caso de Uso Algoritmo para determinar melhor Resistor em série com o termistor

Utilizando a técnica da inclusão de um resistor em série com o termistor, pode-se realizar o estudo para diminuir a não linearidade da curva do termistor com a temperatura. Um software em Java foi desenvolvido para realizar o cálculo desta configuração e foram realizadas simulações numéricas para determinar o melhor valor de resistor para ser colocado em série com o termistor. A Fig. 3.8 representa o modelo de caso de uso do algoritmo para determinar melhor Resistor em série com o termistor.

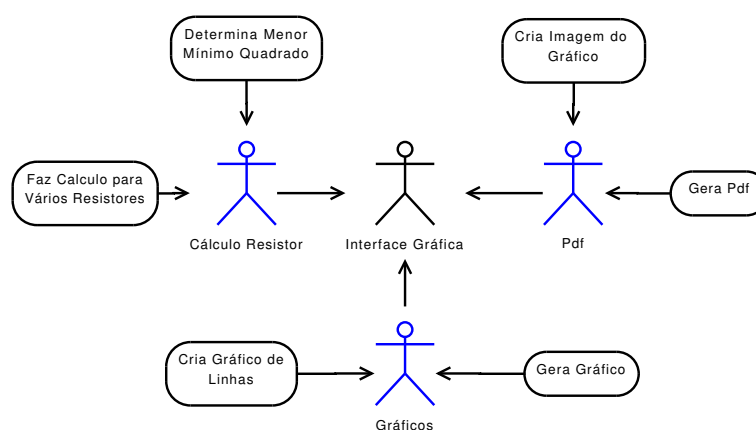


Fig. 3.8: Modelo de Caso de Uso para o melhor resistor.

Os resultados foram gerados em forma de gráficos e serão analisados abaixo. Admite-se que a curva do termistor seja do tipo:

$$R_T = R_o e^{\beta(\frac{1}{T_{laser}} - \frac{1}{T_o})}. \quad (3.1)$$

Ao utilizarmos o resistor calculado, a tensão de saída do divisor resistivo apresenta não linearidade máxima de 1,5% e a resolução da medida de temperatura pode ser dada pela resolução do conversor A/D que será usado para ler a mesma. Os resultados obtidos com as simulações numéricas para a linearização do termistor são apresentadas nas figuras 3.9 e 3.10.

Se a linearização não fosse realizada, poderia ocorrer perda de resolução na medida de temperatura devido à compressão dos dados de entrada. Evidentemente, para a correção completa da linearidade, será necessário fazer uma leitura digital através da consulta de uma tabela previamente gravada no microcontrolador.

É possível estimar a possibilidade de medir a temperatura usando esta técnica com um erro menor do que 1%, já levando em conta outros erros que são inerentes à técnica que será empregada e que influenciarão a medida da temperatura (como, por exemplo, a estabilidade do comprimento de onda

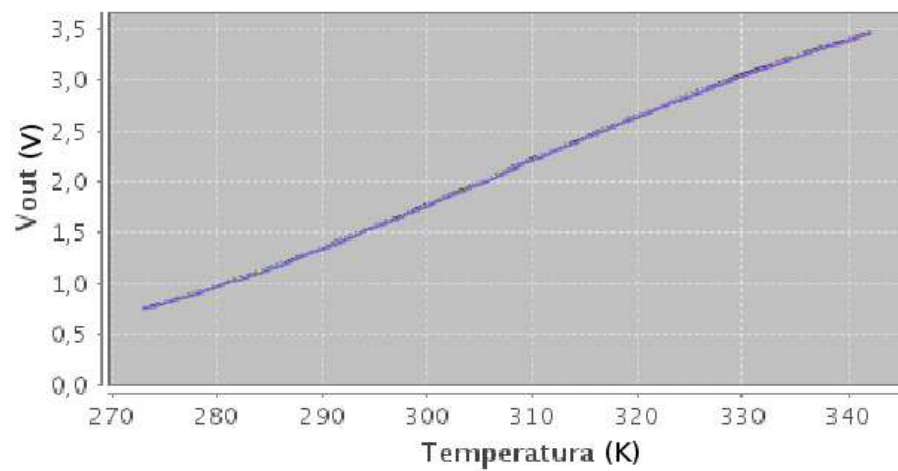


Fig. 3.9: Tensão de saída sobre o termistor em função da temperatura para o sistema utilizando o resistor ótimo de linearização.

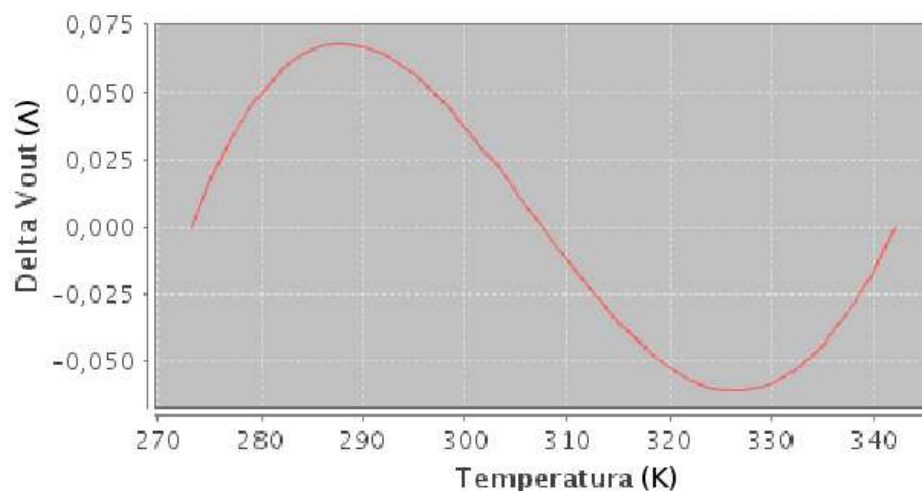


Fig. 3.10: Erro de linearidade na tensão de saída sobre o termistor em função da temperatura para o sistema utilizando o resistor ótimo de linearização.

no ponto de operação).

Foi realizado um teste do circuito com o laser e o termistor, para verificar qual a estabilidade do sistema e, portanto, determinar com que precisão será possível medir a temperatura utilizando esta técnica. Foi possível realizar o primeiro teste completo do novo sensor, já sob diferentes temperaturas, para poder avaliar se o circuito de controle efetivamente corrige o ponto de operação do sistema laser mais grade de Bragg.

3.3.3 Caso de Uso Sensor de Temperatura SPI

O sensor de temperatura LM95071 foi utilizado para a calibração do sistema. Através do equipamento OSA verificou-se o comprimento de onda da grade de Bragg e mediu-se a temperatura através do LM95071. Neste processo foi possível relacionar o comprimento de onda da grade com a temperatura. Na figura 3.11, pode-se observar a curva com a variação temperatura em relação com o comprimento de onda da grade. Com essa curva é possível medir a temperatura da grade.

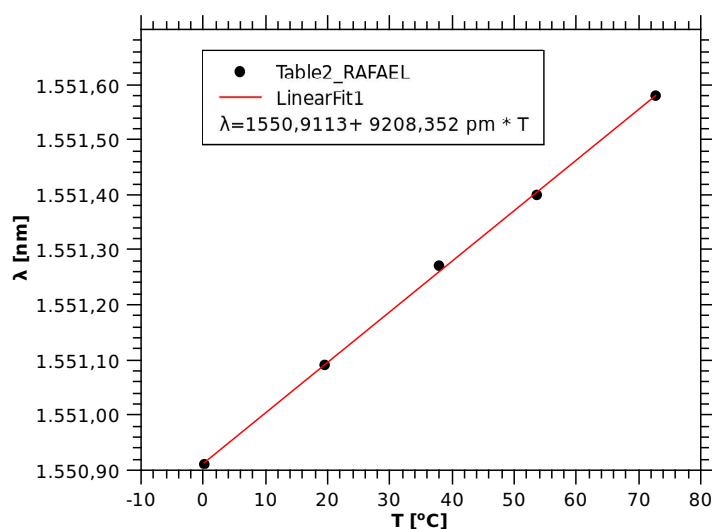


Fig. 3.11: Variação do comprimento de onda da grade em relação à temperatura.

O LM95071 é um sensor de temperatura digital de baixa potência, alta resolução com uma interface compatível com SPI e MICROWIRE, disponível em SOT-23 de 5 pinos. Sua baixa corrente de operação é útil em sistemas onde baixo consumo de potência é um fator crítico. Possui 13 bits de resolução de temperatura mais o bit de sinal (0,03125°C por LSB) e pode operar em uma faixa de temperatura de -40°C a +150°C. Sua faixa de tensão varia entre 2,4V a 5,5V, com uma taxa de conversão rápida, baixa corrente de consumo e uma interface SPI simples faz dele um sensor ideal para uma ampla faixa de aplicação. A precisão da temperatura medida na faixa de 0°C a 70°C é de 1°C, enquanto para a faixa de -40°C a 150°C é de 2°C. O diagrama de conexão do LM95071 pode ser observado na figura 3.13.

Descrição dos Pinos:

- CS - Seleciona o dispositivo para comunicação quando o sinal estiver em baixo.
- GND - Sinal negativo da alimentação (Terra).
- SI/O - Pino serial bi-direcional de envio ou recebimento de dados.

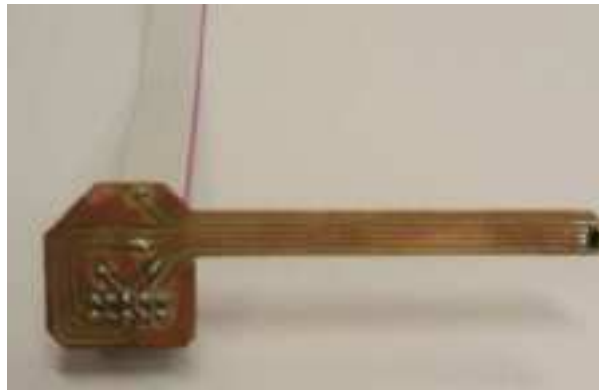


Fig. 3.12: Sensor SPI.

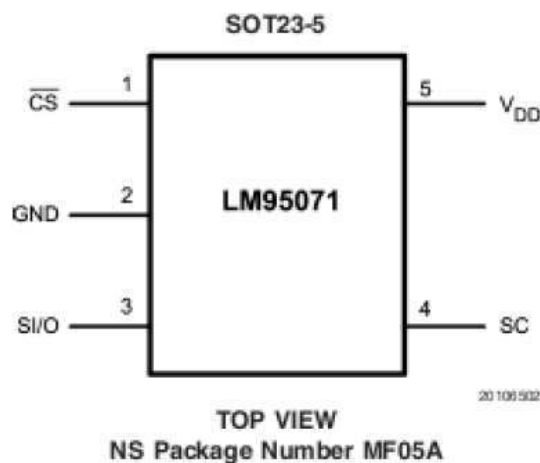


Fig. 3.13: Diagrama de Conexão do LM95071.

- SC - Pino de sinal de clock para envio e recebimento de dados.
- VDD - Sinal positivo de alimentação.

Através do microcontrolador 8051CF120, implementou-se em linguagem C um programa para realizar a comunicação SPI entre o sensor e o microcontrolador.

3.3.4 Modelo de Caso de Uso Algoritmo de Busca

O projeto consiste em desenvolver um algoritmo inteligente, capaz de fazer o monitoramento de temperatura em grades de Bragg, através de uma auto calibração do sistema, determinando o ponto ótimo de operação. O ajuste dos parâmetros de ganho dos circuitos de controle e corrente ótima de polarização do laser, para que se trabalhe com a potência ideal no sistema do sensor são algumas das funções do algoritmo. A figura 3.14 e descreve o funcionamento do algoritmo.

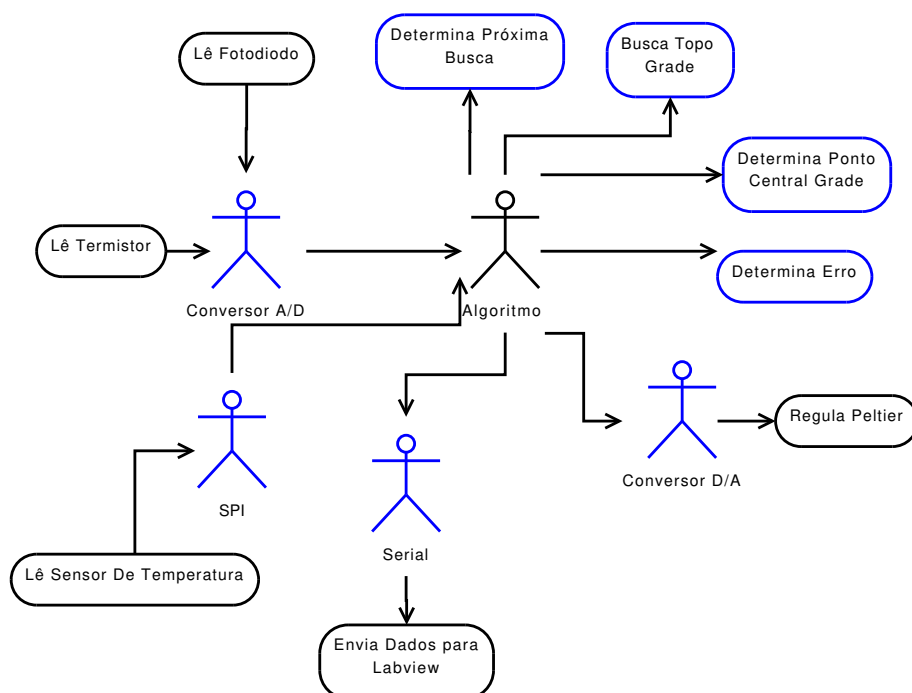


Fig. 3.14: Modelo de Diagrama de Caso de Uso do algoritmo de busca da Grade de Bragg

O microcontrolador será responsável por gerenciar os periféricos do sistema, realizando medições de temperatura no local onde a grade de Bragg estará localizada. As leituras são mostradas através de um programa de computador realizado em Labview.

A técnica de medida excita com correntes controladas o circuito do Peltier (no encapsulamento do laser), de forma que o comprimento de onda da grade de Bragg, seja igual a do comprimento de onda do laser. Em princípio, a medida da corrente do Peltier, poderia ser usada como uma medida indireta de temperatura da Grade de Bragg, mas como a eficiência do Peltier varia com a temperatura ambiente, esta técnica seria bastante imprecisa, podendo gerar erros na ordem de vários graus Celsius.

Para realizar a medida, foi utilizado um termistor, que se encontra dentro do encapsulamento do laser. Sabe-se que, ao se conhecer a temperatura do laser, pode-se obter o comprimento de onda na sua saída. Ao ler o valor do termistor (resistor semiconductor sensível à temperatura) quando o sistema laser, peltier e grade de bragg estiverem estabilizados, é obtida uma leitura indireta da temperatura com grande precisão, no local onde a grade de Bragg está submetida.

Inicialmente é realizado uma busca pelo formato da grade. Esta, visa encontrar a melhor caracterização da grade de Bragg para o sistema proposto. O microcontrolador aumenta a temperatura interna do laser gradativamente, através de um conversor D/A. O aumento de temperatura interna do laser proporciona um novo comprimento de onda na saída do fotodiodo. Após aferir um novo valor no peltier, é realizada uma leitura da reflexão da grade proveniente do fotodiodo através de um conversor A/D. Esses resultados são gravados em um vetor .

O algoritmo para determinar o ponto onde a grade de Bragg se encontra na fibra, representado pela figura 3.15, consiste em encontrar o formato da grade, armazenando os valores lidos do fotodiodo em um vetor chamado topo da grade. Esse vetor tem por objetivo guardar os prováveis valores relacionados ao topo da grade. Após o primeiro elemento do vetor ser guardado, calculamos o erro pertinente a esse elemento.

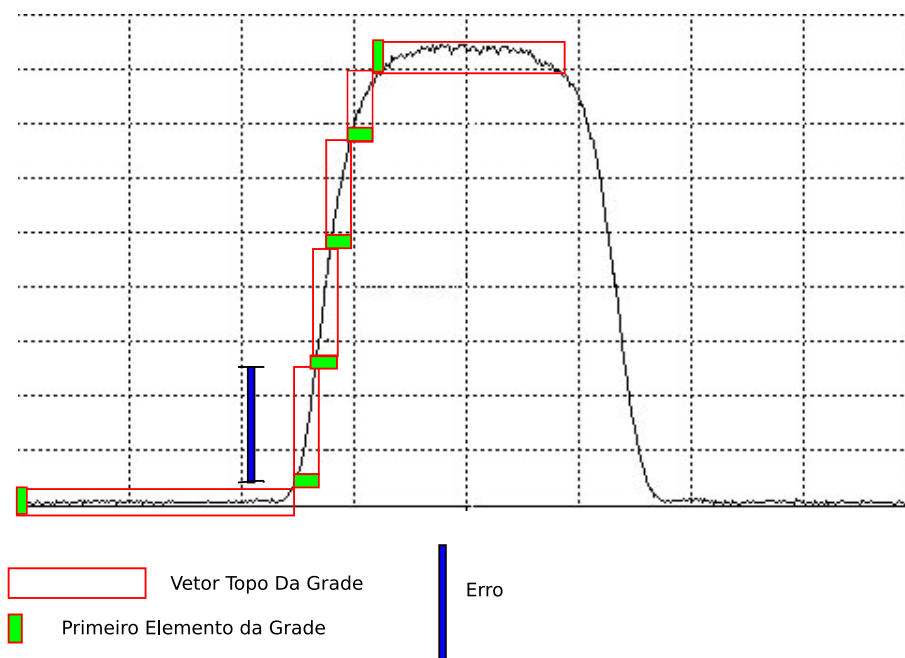


Fig. 3.15: Representação Gráfica do funcionamento do Algoritmo

O erro é um valor calculado sobre o primeiro elemento da grade, multiplicando-se o valor desse por um valor em porcentagem. Ele determina quais valores serão armazenados dentro do vetor. A medida que os dados forem armazenados, são comparados com o erro e verifica se o dado armazenado pertence ao conjunto de dados topo da grade.

Se o dado lido for menor do que o erro, o dado é guardado na grade. Caso o valor lido do fotodiodo menos o primeiro elemento da grade, seja maior do que o erro, o algoritmo determina que há um novo valor a ser considerado primeiro elemento do topo da grade, e um novo vetor passa a ser formado.

A busca termina ao encontrar o vetor que possuir melhor simetria e amplitude, caracterizando uma grade, uma vez que grades de Bragg possuem características que estão livres de serem confundidas com ruídos. O algoritmo se repete, procurando a grade no sistema ótico. Ao encontrar a grade, consegue-se obter o valor da temperatura através de leitura do termistor para o centro da grade.

Para que não seja necessário varrer todo o espectro da fibra ótica a cada variação de temperatura da grade, a nova busca ocorrerá nas proximidades da busca anterior, determinando o ponto mais provável onde a grade se encontrará no próximo passo. Com essa técnica de varrer apenas um pequeno pedaço

da fibra, consegue-se aumentar a vida do laser, uma vez que esse não será forçado a procurar por toda fibra a grade desejada.

Dessa forma, podemos localizar automaticamente a sintonia ótima do sistema laser, peltier, mais grade de Bragg.

3.3.5 Modelo de Caso de Uso Interface Labview para Monitorar Temperatura

Foi construída uma interface gráfica para que os dados provenientes do microcontrolador sejam mostrados ao usuário. A figura 3.16 descreve o funcionamento do programa de aquisição de dados e a figura 3.17 mostra o diagrama de blocos em Labview do programa de aquisição de dados.

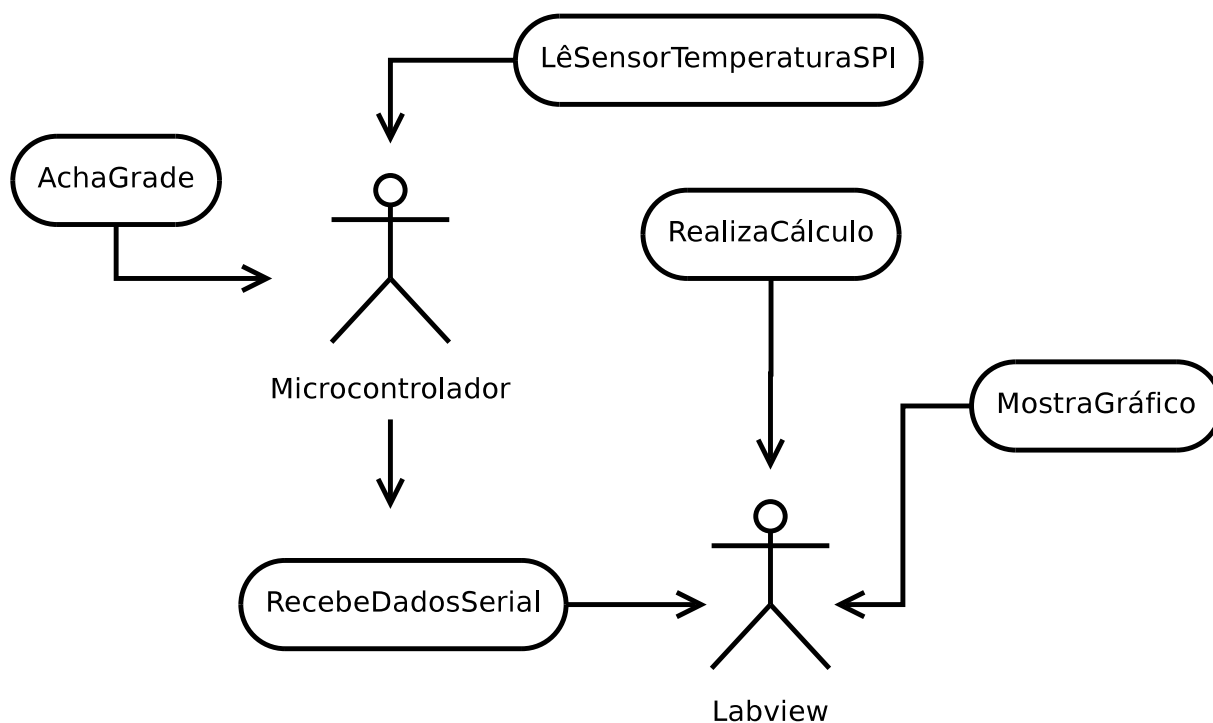


Fig. 3.16: Modelo de Caso de Uso do programa de Labview para aquisição de temperatura

Os dados utilizados para a implementação do sensor são enviados através de uma comunicação serial. Para estabelecer a comunicação serial entre o computador e o microcontrolador 8051CF120, foi necessário configurar o programa em Labview com o auxílio do bloco VISA SERIAL. Nesse bloco, é possível definir parâmetros como a taxa de transmissão, a quantidade de bits, paridade e stop bits. Antes de inicializar a transmissão de dados, foi definido um delay de 500 ms no programa em Labview para a configuração dos parâmetros.

Após o tempo de delay, o programa entra em um *loop while* para realizar a leitura de dados. Na

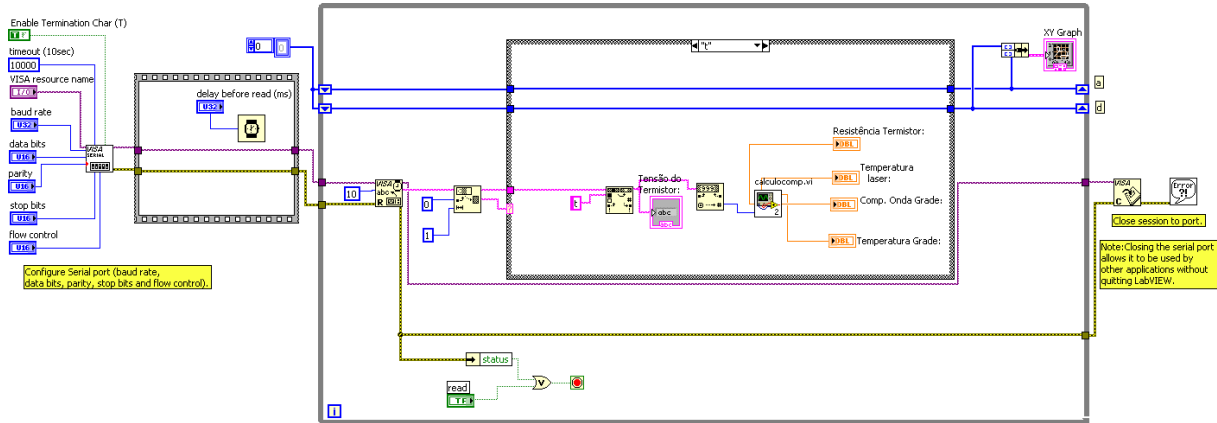


Fig. 3.17: Diagrama de blocos em Labview.

leitura de dados, utilizou-se o bloco VISA READ que envia os dados para um *case*. A estrutura *case* verifica qual é o dado transmitido. Os dados serão transmitidos em formato de *string*. O primeiro termo da *string* lida, define a procedência do dado. Por exemplo, a letra p indica uma leitura da tensão aplicada no peltier, a letra t indica uma leitura na tensão do termistor, a letra f indica uma leitura da tensão do fotodiodo e a letra s indica uma leitura da temperatura do sensor LM95071. Para verificar a localização e a característica da grade, plotou-se um gráfico com os dados do fotodiodo e do peltier que foram armazenados em um vetor.

Na leitura de uma dado do termistor, o programa em LABVIEW deve executar uma série de cálculos (equações 3.2, 3.3, 3.1, 3.5 e 3.6) para obter a temperatura. Na realização desses cálculos, criou-se um subVI calculocomp.vi para deixar o software com uma visualização mais didática e agradável. Essa sub VI pode ser observada na figura 3.18.

Para utilizar o termistor do dispositivo FLD5F6CX-E33, implementou-se um divisor de tensão entre o termistor R_T e o resistor R_1 , conforme pode ser observado na figura 3.3. Assim, tem-se que a tensão do termistor V_T é definida como

$$V_T = \frac{R_1}{R_1 + R_T} V_{ref}, \quad (3.2)$$

onde $V_{ref} = 2,5V$, $R_1 = 5,11K\Omega$. Isolando o termo R_T da equação 3.2, tem-se que

$$R_T = \frac{R_1 V_{ref} - V_T R_1}{V_T}. \quad (3.3)$$

Assim, através da medição de V_T é possível determinar R_T . Contudo,

$$R_T = R_o e^{\beta(\frac{1}{T_{laser}} - \frac{1}{T_o})} \quad (3.4)$$

considerando que o termistor possui um $\beta = 3328,64$, um $R_o = 9350$ e temperatura $T_o =$

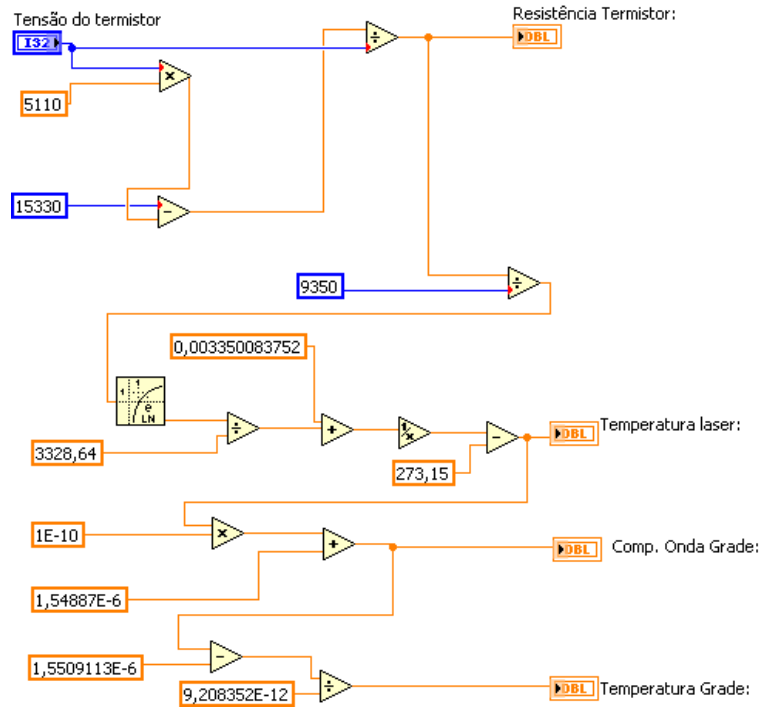


Fig. 3.18: Diagrama de blocos da subVI em Labview.

298,5°K. Assim, através da equação 3.4, pode-se calcular o termo T_{laser} (temperatura do laser). Conhecendo a temperatura do laser, pode-se calcular o comprimento de onda do laser ou da grade através da relação

$$\lambda_{grade} = \alpha T_{laser} + \gamma \quad (3.5)$$

considerando $\alpha = 0.1$ e $\gamma = 1548,87e^{-9}$.

Esta relação foi obtida através do *datasheet* do dispositivo FLD5F6CX-E33. Conforme visto na figura 3.11, a relação entre o comprimento de onda λ_{grade} e a temperatura a ser medida (temperatura da grade) é dada por

$$T_{grade} = \frac{\lambda_{grade} - \phi}{\sigma}. \quad (3.6)$$

considerando $\phi = 1,5509113e^{-6}$ e $\sigma = 9,208352e^{-12}$.

Assim, através da equação 3.6, pode-se determinar a temperatura desejada.

3.4 Diagramas de Robustez

Através do uso da análise Robusta, assegura-se que a descrição dos casos de uso estão corretos, pois tem como finalidade conectar a parte de análise com a parte de projeto, visando construir um modelo através das narrativas de texto dos casos de uso. Os objetos que participam de cada caso de uso são identificados e podem ser classificados de três tipos. 3.19



Fig. 3.19: Representação dos objetos limite/interface, controlador e entidade

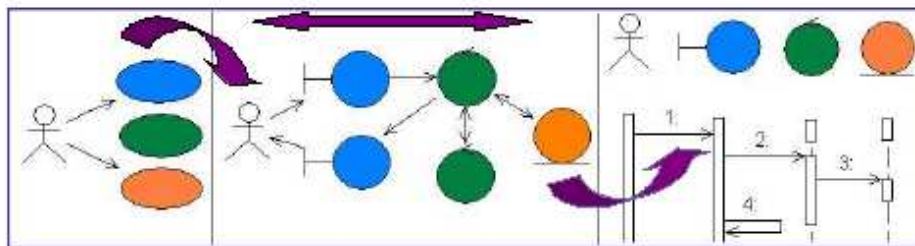


Fig. 3.20: Conecta a fase de análise com a fase de design.

Na figura 3.21 será descrito a modelagem do diagrama de Robustez para a leitura do termistor. Não será realizado o levantamento de todos os diagramas de Robustez nesse trabalho, para que o mesmo não fique extenso.

3.5 Diagramas de Sequência

Os diagramas de sequência têm por finalidade construir um modelo dinâmico entre o usuário e o sistema, detalhando cada fluxo de ação, pois ao concluir o modelo de domínio e análise robusta descobre-se os objetos do problema e seus atributos e relações.

Eles foram produzidos a partir dos diagramas de Robustez e um exemplo é demonstrado na figura 3.22.

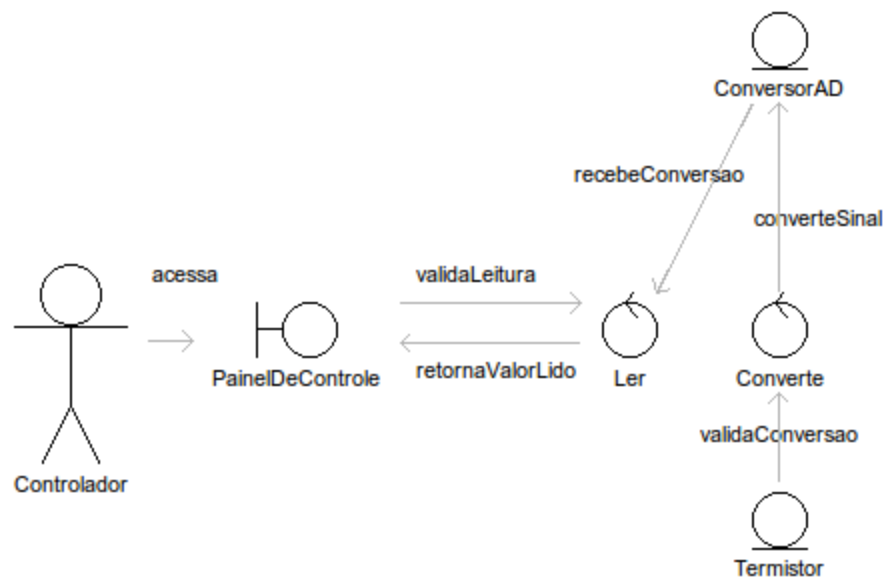


Fig. 3.21: Diagrama de Robustez para o Termistor.

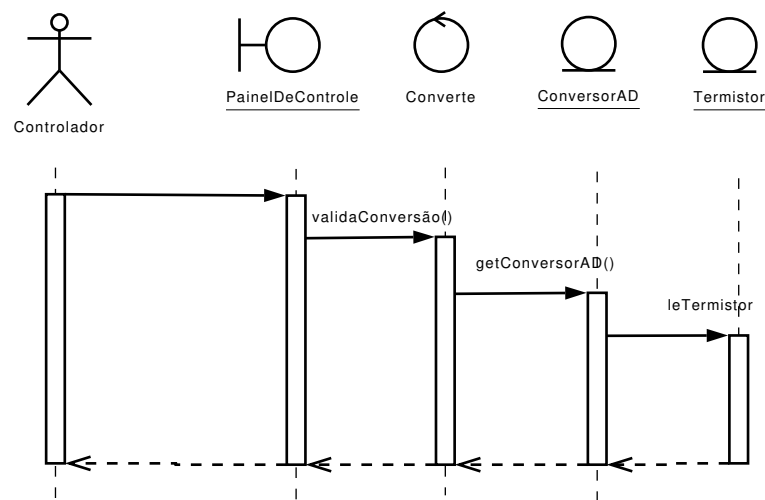


Fig. 3.22: Diagrama de Sequência para o Termistor.

3.6 Diagramas de Classe

O diagrama de classes é o modelo de domínio que foi atualizado ao longo do *Iconix* e representa as funcionalidades do sistema de modo estático como um todo. Nesse projeto, foi utilizada a linguagem de programação C (estruturada). Com isso, as classes aqui representadas, serão transformadas em arquivos .c e demonstradas nas figuras 3.25, 3.23 e 3.24. O programa para determinar o melhor resistor foi realizado em Java.

Neste capítulo foi apresentado a construção do sistema de para medir temperatura com grades de

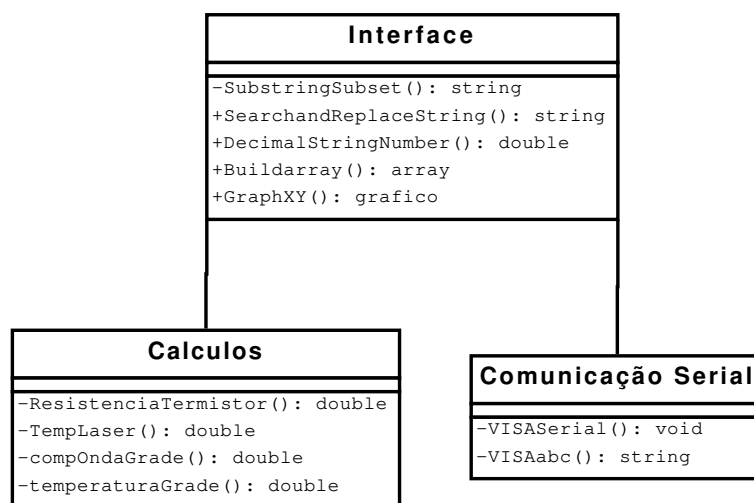


Fig. 3.23: Diagrama de Classe do programa Labview

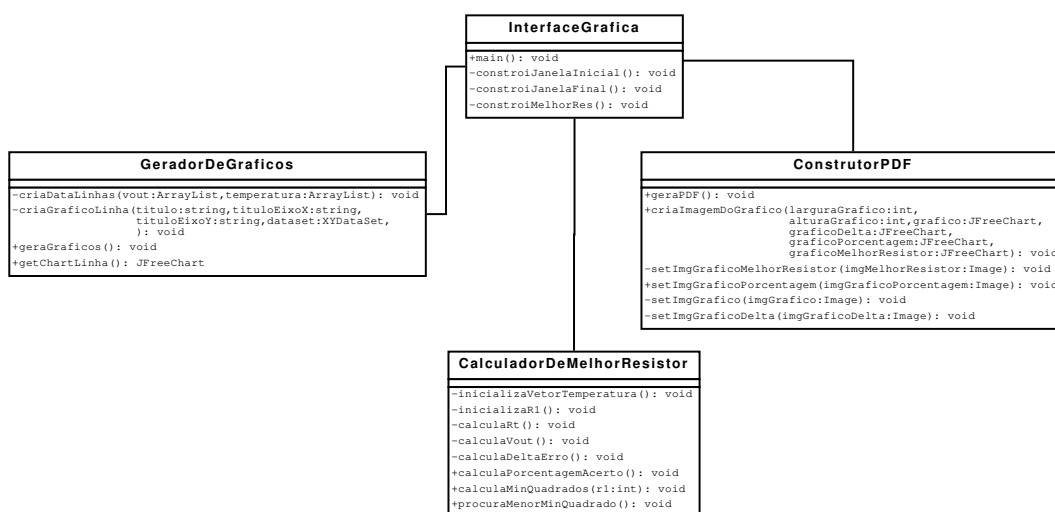


Fig. 3.24: Diagrama de Classe do programa para determinar o melhor resistor

Bragg e o algoritmo para para detecção de grades. O resultado do algoritmo é a determinação do ponto onde a grade está localizada dentro do espectro da fibra ótica. Pode-se determinar de forma indireta a temperatura, encontrando o ponto onde a grade está localizada. O objetivo foi obter uma solução com menor custo para determinar a grade.

No próximo capítulo é feita uma análise dos resultados alcançados com a nova técnica de medida de temperatura, demonstrando a eficácia em se utilizar fibras óticas com grade de Bragg para medir temperatura.

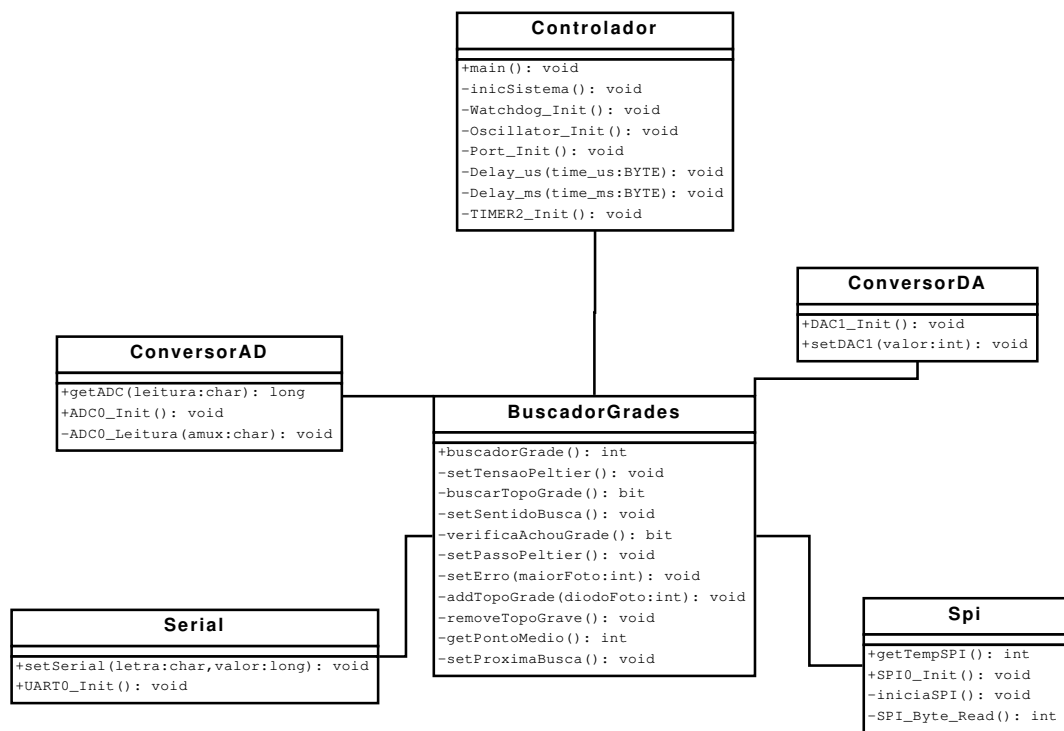


Fig. 3.25: Diagrama de Classe do algoritmo de monitoramento de Temperatura

Capítulo 4

Resultados e Discussões

Aqui são apresentados os resultados e discussões sobre estudo realizado. Fundamenta-se os procedimentos realizados para a construção do projeto, os recursos utilizados e a maneira como foram implementados. É realizada uma correlação entre resultados obtidos e os objetivos enumerados no início da dissertação, evidenciando os pontos de sucesso juntamente com aqueles que representaram os maiores desafios.

4.1 Sistema Emulador da Grade

Para que o algoritmo proposto pudesse ser validado sem causar danos ao laser, que é um dispositivo caro que se queima facilmente, foi construído um sistema emulador de grades de Bragg. O sistema proposto tinha como característica emular uma grade de Bragg gerando diferentes formatos. Com isso pode-se testar o algoritmo para diferentes grades, comprovando a eficácia do mesmo.

O circuito emulador da grade de Bragg é representado pela figura Fig. 4.1, o circuito pela Fig. 4.2 e a grade encontrada é demonstrada na figura Fig. 4.3.

Esse sistema foi muito importante para realizar os primeiros testes do algoritmo, garantindo o funcionamento do mesmo para diferentes tipos de grades. Com ele pode-se realizar as primeiras funções para acionar os dispositivos A/D, D/A, comunicação serial e sensor SPI. As grades foram emuladas variando a amplitude e a largura através de um potenciômetro que controlava o formato da grade.

Também foi construído um circuito para amplificar a saída do sinal do D/A de 0 a 2,5V para +-8V mostrado na figura Fig. 4.4 e o circuito pela Fig. 4.5.

Testes foram realizados para grades com pequenas à grandes amplitudes, com diferentes tipos de largura. O sistema detectou com precisão as grades, sempre encontrando o ponto central.

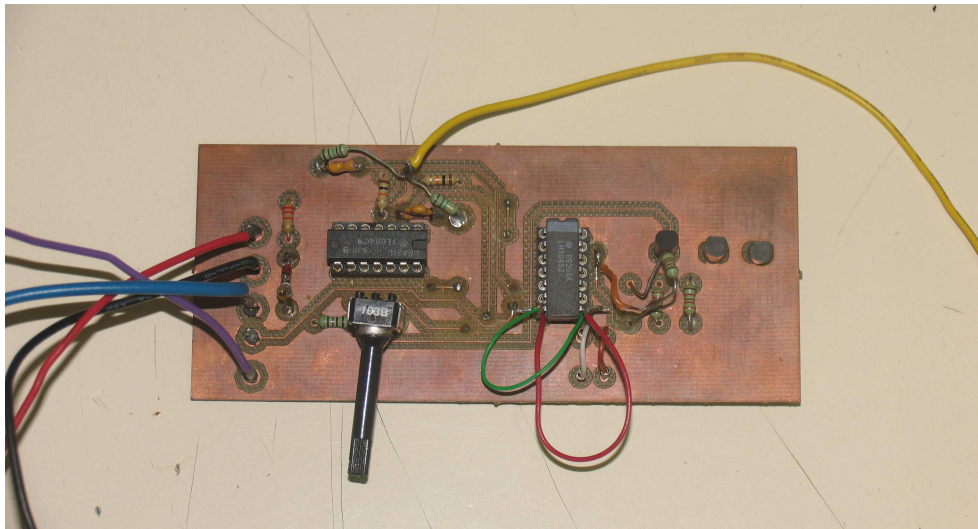


Fig. 4.1: Emulador da Grade de Bragg[4]

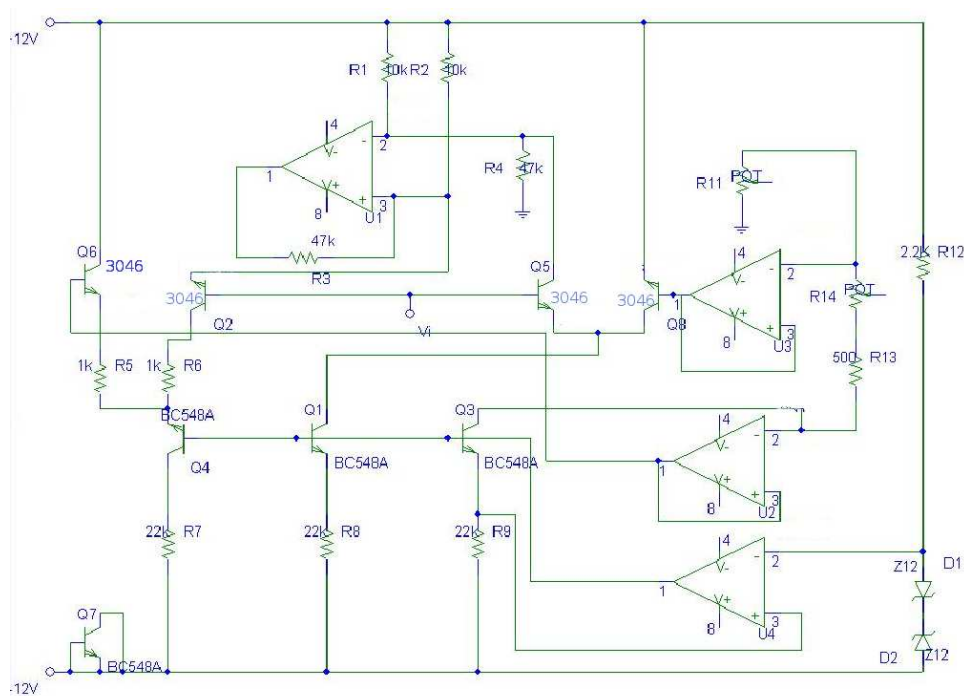


Fig. 4.2: Circuito emulador da Grade de Bragg[4]

4.2 Montagem e Funcionamento do Sistema

Buscando comprovar a eficácia de se utilizar fibras com grade de Bragg para medir temperatura, alguns testes foram realizados, após montagem e programação do sistema. Foram utilizados um laser DFB FLD5F6CX-E33, um microcontrolador C8051F125 e uma grade de Bragg AVENSYS

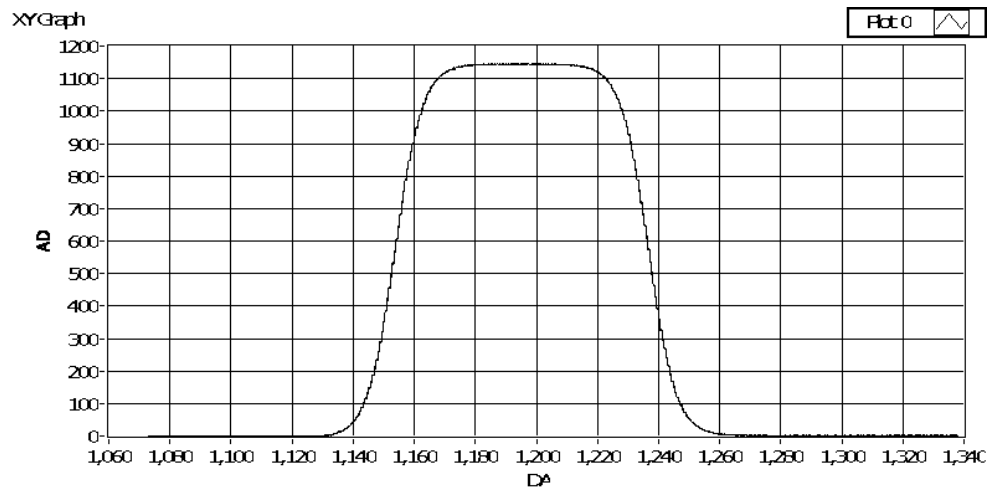


Fig. 4.3: Grade encontrada pelo emulador

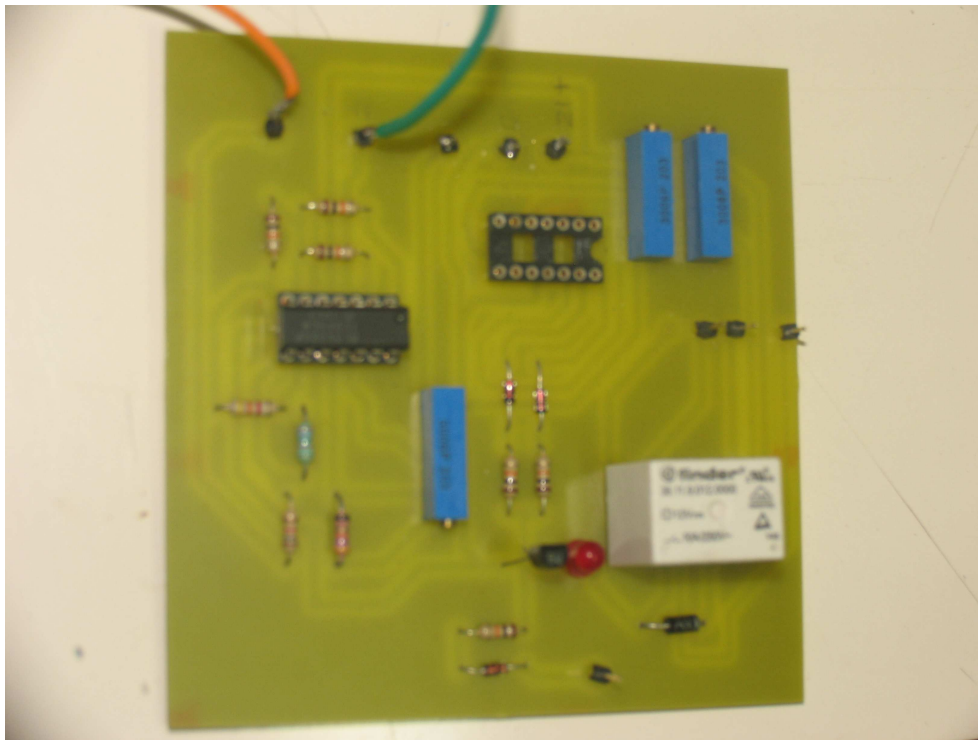


Fig. 4.4: Amplificador do sinal do D/A[4]

centralizada em 1551 nm.

Para medir a temperatura, iluminou-se a grade de Bragg com um laser, com largura espectral suficiente para cobrir a faixa esperada de deslocamento. O sistema é capaz de demodular a informação contida no espectro refletido e localizar a grade de Bragg na rede.

O microcontrolador foi programado para realizar a varredura entre limites de temperatura (15-

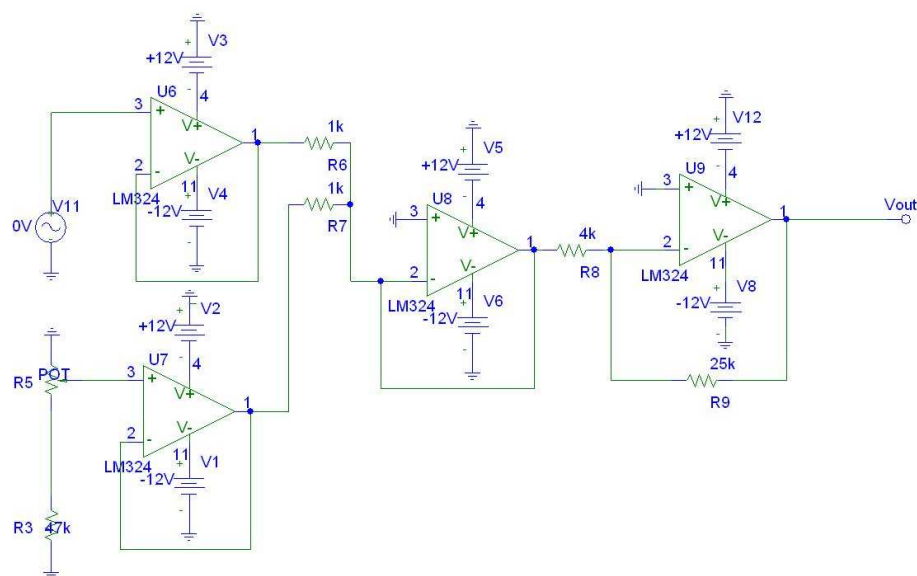


Fig. 4.5: Circuito do amplificador do sinal do D/A[4]

35°C) do laser. Um algoritmo foi escrito para detectar o ponto médio do perfil do topo da grade de Bragg. A partir desse ponto é possível determinar de forma indireta a temperatura da grade.

A grade de Bragg é refletida para o fotodetector do circuito e o algoritmo processa as informações obtendo o ponto no qual a grade está centralizada. A variação da grade é de poucos nanômetros para temperaturas na faixa de vários graus. Os dados são mostrados em um programa de monitoramento no computador.

Devido a necessidade de monitorar o sistema em curtos intervalos de tempo e proporcionar ao usuário uma interface de controle, onde pudesse ser visualizado dados como: temperatura do sensor SPI e da grade, comprimento de onda da grade, resistência do termistor, tensão no termistor e temperatura do laser, foi construída uma interface em Labview para monitoramento dos equipamentos envolvidos no sistema apresentado na figura Fig. 4.6.

Com o programa no computador, pode-se observar os resultados obtidos e identificar um sistema capaz de monitorar temperatura em sistemas ruidosos, sendo independente de variações da amplitude da grade. O algoritmo proposto consegue monitorar a grade de Bragg, mesmo quando essa apresenta algumas variações de amplitude ou até mesmo pequenas e médias deformações na grade.

O programa em Labview também possui uma tela para configurar a comunicação serial entre o microcontrolador e o computador. Nela define-se a porta, taxa de transferência, bits de paridade, o controle e tempo entre leituras.

A interface disponibiliza através de gráficos os resultados das leituras de tensão no termistor x temperatura do SPI, tensão no fotodiodo x tensão no termistor, tensão no fotodiodo x lambda da grade, tensão no foto diodo x temperatura. Dessa forma pode-se monitorar o funcionamento do algoritmo

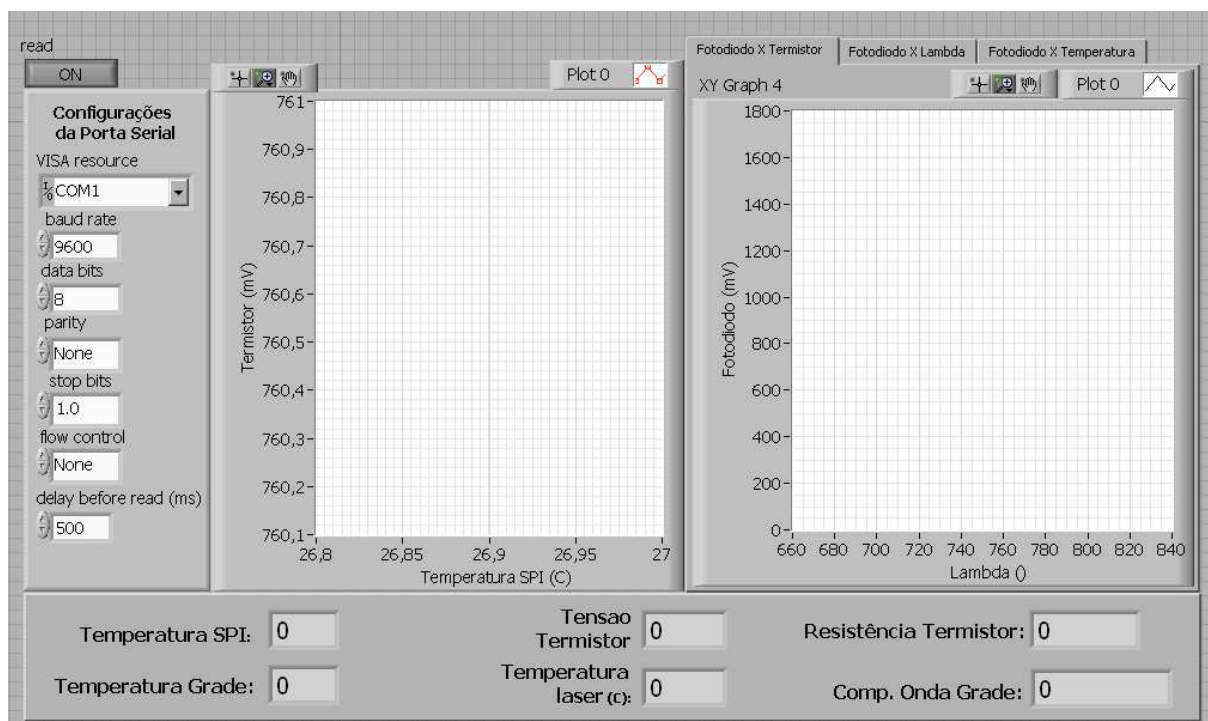


Fig. 4.6: Tela do programa em Labview

para diferentes parâmetros, obtendo-se uma leitura dos dados, mostrando o formato e o deslocamento da grade quando há variação de temperatura. Assim pode-se construir um sistema capaz de mostrar as informações para o usuário assim como o dispositivo OSA.

4.3 Busca pela Grade de Bragg

No sistema de interrogação com grades de Bragg na primeira busca, o sistema altera o valor do peltier através do conversor D/A de 12 bits, variando o comprimento de onda na saída do laser. Com isso varre-se o espectro da grade, buscando o valor máximo de reflexão da grade, ou seja, o local onde a grade se encontra.

Após a primeira leitura e visando aumentar a velocidade de busca do sistema e diminuir o estresse do laser, a próxima busca deverá ficar na proximidade da busca anterior.

Durante a varredura, aquecendo e resfriando o peltier do laser, cada ponto lido pelos conversores A/D de 12 bits na saída de tensão no termistor e tensão no fotodiodo são armazenados na memória microcontrolador e enviados ao computador. Cada dado é enviado através de uma palavra ao computador utilizando a interface RS-232. Os dados lidos são mostrados na tela, juntamente com a temperatura mensurada naquele instante. A grade para cada instante pode ser visualizada na Fig. 4.7

Após encontrar a grade, o microcontrolador envia o ponto médio do termistor ao computador,

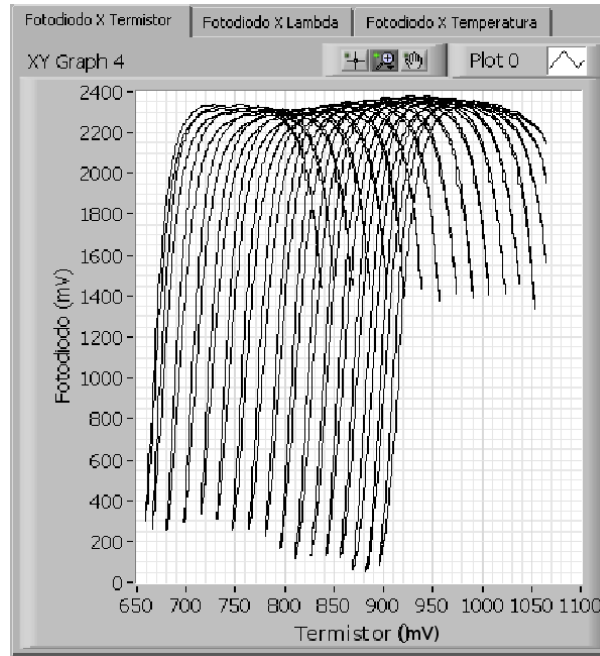


Fig. 4.7: Gráfico da variação da grade para várias medidas de temperatura

através de uma palavra, informando ao computador que encontrou a grade de Bragg. O programa em Labview calcula de forma indireta a temperatura e mostra o valor ao usuário.

No entanto, para usar essa abordagem, tanto o laser DFB, o termistor e a FBG têm de ser previamente caracterizados.

Outra possibilidade para o funcionamento do sistema é simplesmente a execução de uma calibração do sistema, por aquecimento/esfriamento do sensor e medir a temperatura da grade de Bragg (utilizando um sensor de temperatura) em função dos valores de tensão no termistor.

Com isso gera-se uma curva de calibração tensão no termistor x temperatura do sensor SPI para o sistema. Tal procedimento é muito mais simples, mais rápido e mais barato, pois é necessário realizar apenas uma etapa de calibração.

4.4 Análise dos Resultados

No arranjo experimental, a temperatura da grade de Bragg foi monitorada através de um sensor de temperatura SPI, o LM95071 [7], com resolução de 12 bits. O método de calibração utilizou os valores medidos da tensão do termistor x temperatura do sensor SPI e foram plotados gerando uma expressão polinomial de segundo grau, como mostrado na equação.

$$V_T = 695,0114 + 2,0865T + 0,0028T^2 \quad (4.1)$$

Assumindo que os valores medidos pelo LM975071 estão corretos, o erro de escala dos valores calculados da temperatura da FBG, usando ajuste polinomial de segundo grau, é menor do que 0,4%, em um intervalo de temperatura de 100°C, como representado na Fig. 4.8.

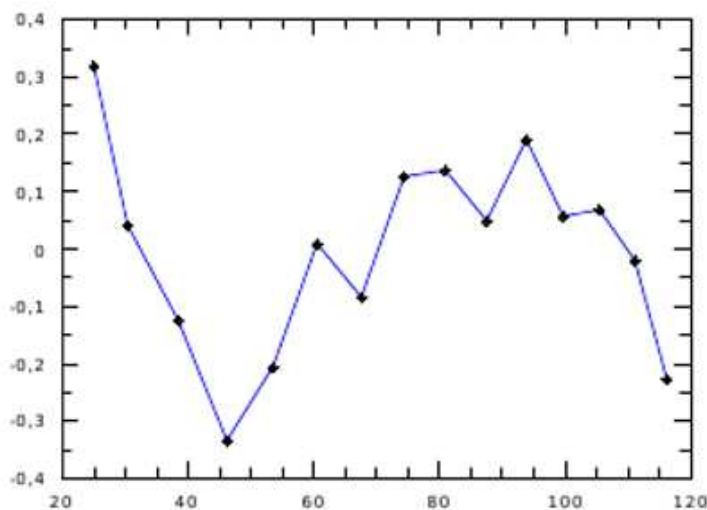


Fig. 4.8: Erro de escala dos valores calculados da temperatura da FBG

A Fig. 4.9 mostra os dados recebidos durante a variação do forno de 20°C a 120°C, obtida pelo programa em Labview para as diferentes temperaturas obtidas.

Alguns problemas também foram identificados, como a lenta resposta do sistema para mensurar a temperatura. O alto tempo de resposta para estabilizar o termo elemento é um dos fatores que causa a lentidão do sistema, na ordem de uma dezena de segundos.

Este atraso é observado ao se esfriar o peltier, podendo ser visualizado através da diferença existente entre o lado direito e o esquerdo da grade representados pela Fig. 4.10. O atraso deve-se ao tempo de resposta do peltier para alterar a temperatura setada via microcontrolador.

O sistema proposto também apresentou características singulares, pois proporciona uma medida bastante precisa de temperatura, apresentando uma resolução de 0,7°C.

O gráfico apresentado na figura Fig. 4.11 mostra a relação entre temperatura do SPI e temperatura obtida pela grade de Bragg, ao aquecer o forno onde a mesma estava inserida. Pode-se observar que o sistema obteve uma boa resposta, verificando pela linearidade da curva apresentada. Tal característica mostra que o projeto obteve excelente resultado.

Observa-se também um deslocamento da linearidade do gráfico quando os dados referentes às temperaturas menores do que 20°C são inseridas. Para mensurar valores menores do que 20°C o sistema teve que ser desligado e inserido na geladeira. Com isso não foi possível obter de forma contínua os dados representados pela figura Fig. 4.12.

A figura Fig. 4.13 mostra os dados adquiridos quando o forno estava esfriando. O gráfico apre-

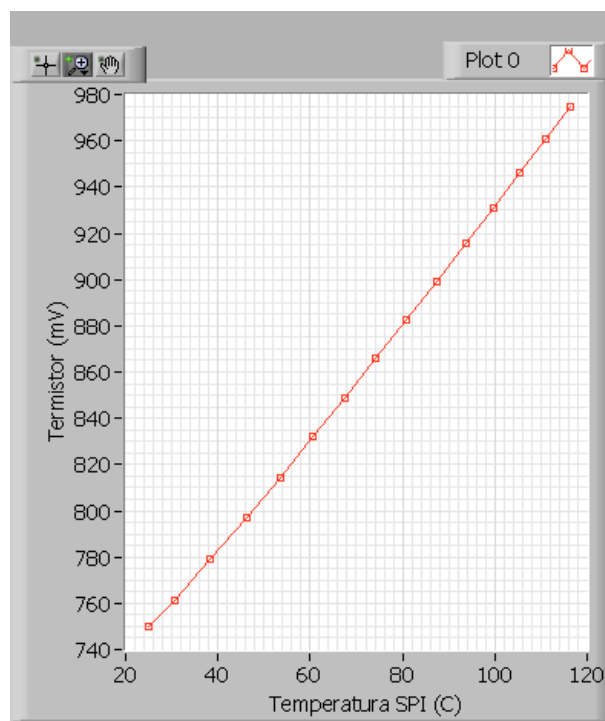


Fig. 4.9: Gráfico Temperatura da Grade(°C) x Temperatura SPI(°C)

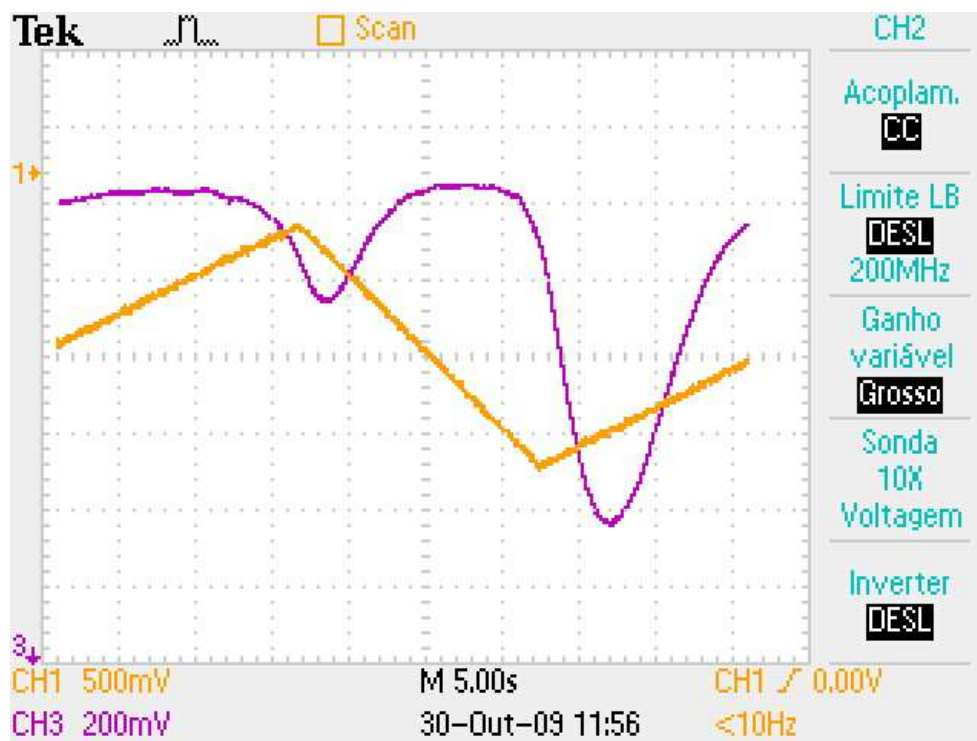


Fig. 4.10: Leitura da tensão do termistor(amarelo) e tensão no foto diodo(rosa)

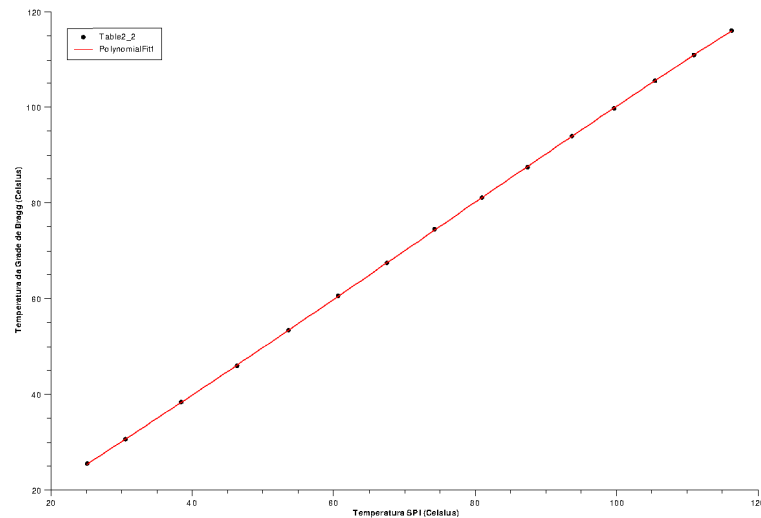


Fig. 4.11: Gráfico Temperatura da Grade(°C) x Temperatura SPI(°C)

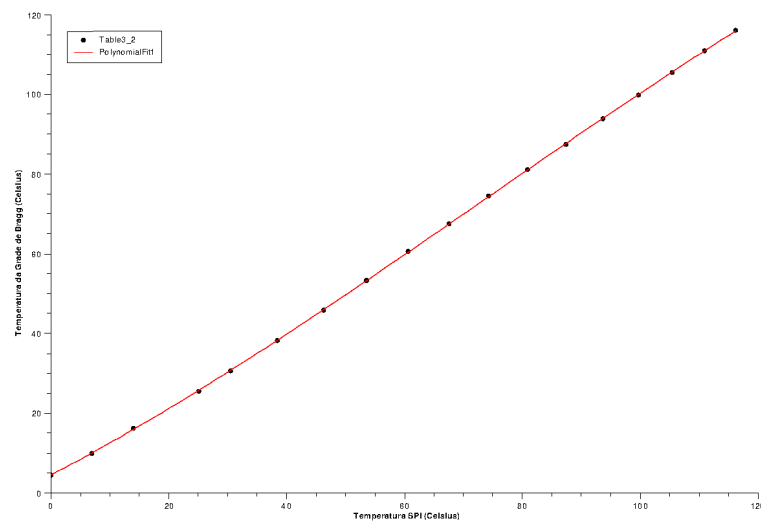


Fig. 4.12: Gráfico Temperatura da Grade(°C) x Temperatura SPI(°C)

sentando vários pontos, pois o forno foi perdendo calor lentamente, com isso pode-se observar o comportamento do sensor de temperatura para pequenas variações, demonstrando excelentes resultados.

Neste capítulo foram demonstrados os resultados alcançados para medir temperatura com grade de Bragg. Os resultados se mostraram excelentes, comprovando a eficácia proposta pelo projeto.

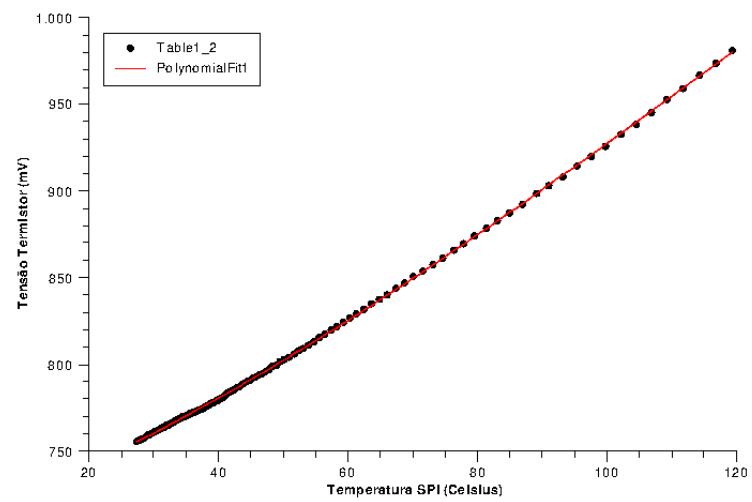


Fig. 4.13: Gráfico Termistor(mV) x Temperatura SPI(°C)

Capítulo 5

Conclusões

A nova técnica para interrogação de sensores a fibra ótica com grades de Bragg foi demonstrada apresentando grande precisão. Os resultados experimentais comprovaram que o uso de um simples procedimento de calibração, gerando um polinômio de segunda ordem para a curva de calibração, foi capaz de comprovar a técnica proposta para medir temperatura num intervalo de 100°C. Essa técnica apresenta um erro inferior a 0.4%.

O laser usado no experimento tem uma pequena faixa de comprimentos de onda (2nm), o que limita a faixa de temperatura utilizando grades de Bragg a ser medida em aproximadamente 150°C, uma vez que as redes de Bragg, geralmente, apresentam uma sensibilidade térmica de 0,01 nm/°C. No entanto, pode-se utilizar outros lasers comercialmente disponíveis, capazes de escanear 8nm, de modo que o sistema poderia medir temperaturas até 800°C.

A grade utilizada poderia possuir uma largura menor para que as leituras pudessem ser realizadas mais rapidamente, visto que a grade era muito larga, resultando na demora para percorrer todo espectro da grade.

No projeto proposto, construiu-se um sensor ótico inteligente que monitora temperatura em locais energizados, podendo ser utilizado em locais de difícil acesso e de alta periculosidade, para fazer aquisições de dados na rede de tempo em tempo. O sensor de baixo custo, realizou medidas indiretas de temperatura, sem a necessidade do auxílio de equipamentos caros, como o OSA, podendo ser utilizado no monitoramento da rede de alta tensão, na detecção de falhas, aumento da vida útil de equipamentos e na prevenção manutenível da rede elétrica.

Ao analisar os resultados alcançados e compará-los com os objetivos propostos, acredita-se que obteve-se resultados expressivos.

5.1 Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros, propõe-se a construção de um sistema para monitoramento de inúmeros parâmetros utilizando várias grades em uma mesma fibra. A diferença entre o sistema proposto e o atual, é quanto a utilização do laser para monitorar variados parâmetros físicos relacionados a deformação, vibração, temperatura e pressão com grande precisão e estabilidade em uma mesma fibra. Com esse tipo de sistema pode-se ter informações de muitas variáveis, utilizando apenas um sistema de busca de grades de Bragg.

Referências Bibliográficas

- [1] R. L. LEITE. *Uma contribuição ao estudo e desenvolvimento de sensores de alta tensão baseados em fibras ópticas*. PhD thesis, Universidade Estadual de Campinas, 2006.
- [2] G.S. BORGES. Análise e projeto de filtros Ópticos. Master's thesis, Universidade Federal do Pará, Belém-PA, 2007.
- [3] Sully Milena Mejía Quintero. *Aplicações de Sensores a Rede de Bragg em Fibras Ópticas na Medição de pH e Deformação de Filmes Finos de Alta Dureza*. PhD thesis, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2006.
- [4] Pedro Carvalho Dias. Trabalho de iniciação científica. Technical report, 2009.
- [5] Oostdijck B. W. Cheng, L. K. High-speed structural monitoring using a fiber bragg grating sensor system. *Proc. 15th International Conference on Optical Fiber Sensor*, pages 215–218, 2002.
- [6] A. T. Augousti K. T. V. Grattan. Introduction to fiber optic sensors. *Chapman and Hall*, 1996.
- [7] Edmundo Antonio Soares. Sensores de fibras Óticas. *Sociedade Brasileira de Telecomunicações*, 04:699, 1989.
- [8] Davis M.A. Patrick H.J. LeBlanc M. Koo K.P. Askins C.G. Putnam M.A. Kersey, A.D. and E.J. Friebele. Fiber grating sensors. *J.Lightwave Technol.*, 15:1442–1463, 1997.
- [9] Sang B. Lee Simarjeet S. Saini Athanasios N. Chryssis, Sang M. Lee. High sensitivity evanescent field fiber bragg grating sensor. *IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS*, VOL. 17, JUNE 2005.
- [10] Silicon Labs. C8051f125 data sheet. Página na internet, Lysator, The Academic Computer Society, Agosto 2003. "<https://www.silabs.com>".
- [11] R. Kashyap. Fiber bragg gratings. *Academic Press*, 1999.

- [12] J. R. F. A. CUNHA. Modelo teórico de sensores ópticos baseados em fibras com grade de bragg. Master's thesis, Universidade Federal do Pará, Belém-PA, 2007.
- [13] 1F. M. Araújo 1I. Dias 1L. A. Ferreira 2 1J. L. Santos O. Frazão, 2. Sensores de bragg em fibra Óptica. *Jornadas de Engenharia de Telecomunicações e Computadores*, 1999.
- [14] C. L. Barbosa O. Lisbôa R. C. Rabelo R. M. Cazo, H. T. Hattori. Sensor de deformação usando grades de bragg. *Revista Científica Periódica Telecomunicações*, 03, 2000.
- [15] I. L. Ricarte. Introdução a orientação a objetos. Página na internet, Agosto. "<http://www.dca.fee.unicamp.br/cursos/POOCPP/node3.html>".
- [16] Unified Modeling Language. Unified Modeling Language. Página na internet.
- [17] Kendall Scott Doug Rosenberg. Sequence diagrams: One step at a time. Página na internet, Agosto. "<http://www.dca.fee.unicamp.br/cursos/EA976/Referencias/sd/sdosaat.html>".
- [18] Eudyna Devices USA. *1,550nm DFB DWDM Direct Modulation Laser FLD5F6CX-E Data Sheet*. Eudyna Devices USA, Inc. (2004).

Apêndice A

Apêndices

```
/*
```

```
Programa: Sensor Inteligente para medida de Temperatura
```

Descricao: O presente algoritmo tem como funcao encontrar a grade de Bragg dentro do espectro da fibra optica. Apos encontrar a grade, o sistema determinara o topo da grade, encontrando o ponto medio do topo. Esse ponto será lido, e armazenado. Com ele podemos obter indiretamente a temperatura da grade no ponto selecionado. Essa medida indireta será calculada através de uma formulacao matematica, que converte o valor de temperatura do termistor para um valor em celcius.

Desenvolvido por: Rafael Rocha

```
*/
```

```
/* Como testar:
```

- 1) Faca o Download do codigo para o F12x
- 2) Conectar o cabo serial no pc
- 3) No programa em labview ou outro programa de terminal ajuste os parametros para COM port <BAUDRATE> e 8-N-1
- 4) O programa em Labview mostra o resultado da conexao

```
*/
```

```
//-----  
// Includes  
//-----  
#include <c8051f120.h>  
#include <stdio.h>  
#include "controlador.h"  
#include "buscadorGrade.h"  
#include "conversorAD.h"  
#include "conversorDA.h"  
#include "serial.h"
```

```

#include "spi.h"

//-----
// Definicoes 16-bit SFR
//-----

sfr16 RCAP2      = 0xca;           // Timer2 capture/reload
sfr16 RCAP3      = 0xca;           // Timer3 capture/reload
sfr16 TMR2       = 0xcc;           // Timer2
sfr16 TMR3       = 0xcc;           // Timer3

//-----
// Constantes
//-----
#define SYSCLK      24500000        // Output of PLL derived from (INTCLK*2)
#define SAMPLE_RATE 50000          // Sample frequency in Hz
#define SAMPLE_DELAY 50             // Delay in ms before taking sample
#define CHAR_TERMISTOR 't'         // caracter para envio de info via serial
#define VALOR_MAX_PELTIER 4095
#define VALOR_MIN_PELTIER 0
#define SAMPLE_RATE_DAC 1000000L   // DAC sampling rate in Hz
#define CHAR_TEMPERATURA 's'

void main (void){
    float termistor;
    int temperatura;

    inicSistema();
        Delay_ms(100);

    // Determina a grade e envia serialmente o valor lido da temperatura atual
    while(1){

        termistor = buscarGrade();
        setSerialFloat (CHAR_TERMISTOR,termistor);

        temperatura = getTempSPI();
        setSerial (CHAR_TEMPERATURA,temperatura);

    }

}

//-----
// inicSistema
//-----
// Inicializa os dispositivos internos do Microcontrolador
void inicSistema(){

    Watchdog_Init ();                // Desativa o Watchdog Timer
    Oscillator_Init ();
    PORT_Init ();
    TIMER2_Init ();
    UART0_Init ();

```

```

SPI0_Init ();
ADC0_Init ();           // Init ADC
DAC1_Init ();
iniciaSPI();
}

//-----
// Watchdog_Init
//-----
// Desativa o watchdog timer
//-----
void Watchdog_Init (void)
{
    unsigned char SFRPAGE_save = SFRPAGE; // salva SFRPAGE

    SFRPAGE = CONFIG_PAGE;           // altera SFRPAGE

    WDTCN      = 0xDE;                // desativa Watchdog Timer
    WDTCN      = 0xAD;

    SFRPAGE = SFRPAGE_save;          // restaura SFRPAGE
}
//-----
// Oscillator_Init
//-----
// Inicializa o clock do sistema usando o oscilador em 23.5 MHz
//-----
void Oscillator_Init (void)
{
    unsigned char SFRPAGE_save = SFRPAGE; // Salva a pagina atual SFRPAGE

    SFRPAGE = CONFIG_PAGE;           // Altera SFRPAGE

    OSCICN = 0x83;                   // Aciona o oscilador interno a
                                     // 24.5 MHz

    SFRPAGE = SFRPAGE_save;          // Restaura SFRPAGE
}

//-----
// Port_Init
//-----
// Configura crossbar e portas GPIO
//
// P0.2 - SCK (SPI0), Push-Pull, Digital
// P0.3 - MISO (SPI0), Open-Drain, Digital
// P0.4 - MOSI (SPI0), Push-Pull, Digital
// P0.5 - NSS (SPI0), Push-Pull, Digital
// P0.0 -digital  push-pull    UART TX
// P0.1 -digital  open-drain   UART RX
//
//-----
void PORT_Init (void)
{
    unsigned char SFRPAGE_save = SFRPAGE; // Save the current SFRPAGE

```

```

SFRPAGE    = CONFIG_PAGE;

POMDOUT    = 0x35;
PLMDOUT    = 0x40;

XBR0       = 0x06;
XBR2       = 0x40;

SFRPAGE = SFRPAGE_save;          // Restore the SFRPAGE
}

//-----
// Delay_us
//-----
// Cria um delay especifico em microsegundos usando o TIMER2.
//-----
void Delay_us (BYTE time_us)
{
    BYTE save_sfrpage = SFRPAGE;
    SFRPAGE = TMR2_PAGE;

    TR2    = 0;                // Para o timer
    TF2    = 0;                // Apaga overflow flag
    TMR2    = -( (UINT) (SYSCLK/1000000) * (UINT) (time_us) );
    TR2    = 1;                // Inicia o timer
    while (!TF2);               // Espera pelo overflow
    TR2    = 0;                // Para o timer

    SFRPAGE = save_sfrpage;
}

//-----
// Delay_ms
//-----
// Cria um delay em milisegundos usando o TIMER2
//-----
void Delay_ms (BYTE time_ms)
{
    BYTE i;

    while(time_ms--)
        for(i = 0; i < 10; i++)        // 10 * 100 microsegundos delay
            Delay_us (100);
}

//-----
// TIMER2_Init
//-----
// Inicializa o timer2 e usa no delay.
//-----
void TIMER2_Init (void)
{
    SFRPAGE    = TMR2_PAGE;
    TMR2CF     = 0x08;

```

```

}

/*
PROGRAMA: Sensor Inteligente para medida de Temperatura
DESCRICAO: O presente algoritmo tem como funcao encontrar o ponto onde
a grade de Bragg esta localizada.
Atraves da Leitura do Foto Diodo, conseguimos caracterizar a Grade, ou seja,
determinamos o local onde a grade se encontra dentro do espectro da fibra
'otica.
Alterando o valor do peltier, seja esquentando ou esfriando, alteramos o
comprimento de onda na saida do laser, com isso tentamos casar o comprimento

de onda da saida do laser, com a grade buscada.
Um vez que localizada a Grade, determinamos um ponto no seu centro e realiza-se
a leitura do termistor no referido ponto.

Desenvolvido por: Rafael Rocha

*/

//-----
// Includes
//-----
#include <C8051F120.h>
#include "conversorAD.h"
#include "conversorDA.h"
#include "controlador.h"
#include "buscadorGrade.h"
#include "serial.h"
#include <math.h>
#include "spi.h"

//-----
// Global Constants
//-----

#define TAM_VETOR_GRADE 500

#define CHAR_FOTO_DIODO 'f'
#define CHAR_PELTIER 'p'
#define CHAR_TERMISTOR 't'

// PODERIA TER UM METODO AUTOMATICO
#define NUM_PASSOS_BUSCAR 20

#define VALOR_MAX_TERMISTOR 1058 // Valor maximo que o termistor suporta 1,068 V
#define VALOR_MIN_TERMISTOR 660 // Valor minimo 0,664 V

#define AD0 0
#define AD1 1

#define ESQUENTAR 0
#define ESFRIAR 1

```

```
#define VALOR_INICIAL_PELTIER 1900 // Inicia do meio (Zero)

#define TOPO_GRADE_MIN 400

//-----
// Global Variables
//-----

int erro = 1;

xdata float topoGradeTermistor[TAM_VETOR_GRADE];
xdata int topoGradeFotoDiodo[TAM_VETOR_GRADE];
int sizeTopoGrade;
int tamanhoGrade;

float tensaoPeltier = VALOR_INICIAL_PELTIER;

bit sentidoBusca = 0;
bit primeiraBusca = 0;
int topoGrade;

float termistorCentral = 0;
float termistorCentralAntigo = 0;
float termistor = 0;
float fotoDiodo = 0;
float foto;

float refTermistorMAX = VALOR_MAX_TERMISTOR;
float refTermistorMIN = VALOR_MIN_TERMISTOR;

float buscarGrade(){
bit achouGrade = 0;
termistorCentral = 0;

removeTopoGrade();

while(!achouGrade){

setTensaoPeltier();
setDAC1(tensaoPeltier);

fotoDiodo = getADC(AD0);
setSerial(CHAR_FOTO_DIODO, fotoDiodo);

termistor = getADC(AD1);

setSerial(CHAR_PELTIER, termistor);

achouGrade = buscarTopoGrade();
}
termistorCentral = getPontoMedio();

return termistorCentral;
}

// Aumenta ou Diminui a tensao no Peltier e faz o
```

```
//controle para que o Laser nao ultrapasse os valores maximos pre estabelecidos
void setTensaoPeltier(){

if(sentidoBusca{tinny}ca == ESQUENTAR){
tensaoPeltier = tensaoPeltier + 1;

if ((termistor >= VALOR_MAX_TERMISTOR) | (termistor >= refTermistorMAX)){
sentidoBusca = ESFRIAR;
removeTopoGrade();
}
}else{
tensaoPeltier = tensaoPeltier - 1;

if ((termistor <= VALOR_MIN_TERMISTOR) | (termistor <= refTermistorMIN)){
sentidoBusca = ESQUENTAR;
removeTopoGrade();
}
}
}

bit buscarTopoGrade(){
bit achou = 0;

if(primeiraBusca == 0){
// Busca pelo primeiro elemento da Grade
if((fotoDiodo - topoGradeFotoDiodo[0]) > erro){
removeTopoGrade();
setErro(fotoDiodo);
addTopoGrade(fotoDiodo, termistor);
foto = fotoDiodo;

}else{

//Insere os outros elementos pertencentes ao topo da Grade
if(((fotoDiodo - topoGradeFotoDiodo[0]) < erro) &&
(fotoDiodo >= topoGradeFotoDiodo[0])){

addTopoGrade(fotoDiodo, termistor);
}
else{
achou = verificaAchouGrade();

if((achou == 1) && (sentidoBusca == ESFRIAR)){

achou = 0;
removeTopoGrade();
}

}
}
}

else{
if(fotoDiodo >= foto){
addTopoGrade(fotoDiodo, termistor);
```

```
}
else{
achou = verificaAchouGrade();
}
}
if((achou == 1) && (sentidoBusca == ESFRIAR)){
achou = 0;
removeTopoGrade();
}
return achou;
}

// Procura pelas características de uma grade:
bit verificaAchouGrade(){
int simetria = (fotoDiodo - topoGradeFotoDiodo[0]);

if( (topoGradeFotoDiodo[0] > TOPO_GRADE_MIN) &&
(simetria < 1) &&
(tamanhoGrade > 50) ){

setProximaBusca();
primeiraBusca = 1;
return 1;
}
else{
return 0;
}
}

// O erro eh setado sobre o primeiro elemento do Topo da grade
void setErro(int maiorFoto){
erro = maiorFoto * 0.10;
}

void addTopoGrade(float diodoFoto, float term){
topoGradeFotoDiodo[sizeTopoGrade] = (int)diodoFoto;
topoGradeTermistor[sizeTopoGrade] = term;
tamanhoGrade = sizeTopoGrade;
sizeTopoGrade++;
}

void removeTopoGrade(){
int j;

// Remove os elementos da grade
for(j=0; j <= sizeTopoGrade; j++){
topoGradeFotoDiodo[j] = 0;
topoGradeTermistor[j] = 0;
}
}
```

```
sizeTopoGrade = 0;
}

int getPontoMedioFotoDiodo(){
int pontoMedio = 0;
int indicePontoMedio = 0;

indicePontoMedio = (tamanhoGrade/2);
pontoMedio = topoGradeFotoDiodo[indicePontoMedio];

return pontoMedio;
}

float getPontoMedio(){

int posicaoPontoMedio = 0;
float media = 0;
int anterior = 0;
int posterior = 0;
int i;

posicaoPontoMedio = (sizeTopoGrade/2);
//pontoMedio = topoGradeTermistor[posicaoPontoMedio];

anterior = posicaoPontoMedio - 5;
posterior = posicaoPontoMedio + 5;

for(i = anterior; i <= posterior; i++){
media += topoGradeTermistor[i];
}

media = media / 11;

return media;
}

/*
void setProximaBusca(float termistorRef){

refTermistorMAX = termistorRef + NUM_PASSOS_BUSCAR;
refTermistorMIN = termistorRef - NUM_PASSOS_BUSCAR;
}

*/

void setProximaBusca({tinny}){
{tinny}
if(sentidoBusca == ESQUENTAR){
refTermistorMAX = topoGradeTermistor[tamanhoGrade] + NUM_PASSOS_BUSCAR;
refTermistorMIN = topoGradeTermistor[0] - (NUM_PASSOS_BUSCAR/2);
}else{
refTermistorMAX = topoGradeTermistor[0] + NUM_PASSOS_BUSCAR;
refTermistorMIN = topoGradeTermistor[tamanhoGrade] - (NUM_PASSOS_BUSCAR/2);
}
```

```

}

/*
Conversor AD
*/

//-----
// Includes
//-----
#include <c8051f120.h>
#include <stdio.h>
#include "controlador.h"
#include "conversorAD.h"

//-----
// 16-bit SFR
//-----
sfr16 ADC0      = 0xbe; // ADC0 data

//-----
// Constantes
//-----

#define SYSCLK      49000000
#define SAR_CLK      2500000

//-----
// leituraADC
//-----
//
// Tem por funcao fazer a leitura do AD e armazenar o valor em uma variavel
// Global
//
//          Vref (mV)
// medida (mV) = ----- * Result (bits)
//          (2^12)-1 (bits)
//
//-----
float getADC(char leitura){

char SFRPAGE_SAVE = SFRPAGE;

float medida = 0;                // mV
float medidaFinal = 0;

medida = ADC0_Leitura(leitura);
medidaFinal = medida * 2430 / 4095;

SFRPAGE = SFRPAGE_SAVE;        // Restore SFR page

return medidaFinal;
}

void ADC0_Init (void)
{

```

```

char SFRPAGE_SAVE = SFRPAGE;          //Salva SFR page

SFRPAGE = ADC0_PAGE;

ADC0CN = 0x40;                          // ADC0 desativado, Conversao iniciada
// na escrita do ado Busy
// Dados justificados a direita, modo de Baixo consumo
// (Garante a troca rapida dos multiplexadores)

REF0CN = 0x03;                          // Liga VREF e buffer

    AMX0CF = 0x00;                        // single-ended (default)

    AMX0SL = 0x00;                        // seleciona o pino AIN0.0 do ADC
// como multiplexador

    ADC0CF = (SYSCLK/SAR_CLK) << 3;      // Conversao clock = 2.5MHz

    ADC0CF |= 0x00;                       // ganho PGA = 1 (default)

AD0EN = 1;                              // Liga ADC

    SFRPAGE = SFRPAGE_SAVE;              // Restore SFR page
}

long ADC0_Leitura(char amux)
{
    char SFRPAGE_SAVE = SFRPAGE;          // Salva SFR page
    long result = 0;
    int i;

    SFRPAGE = ADC0_PAGE;

    AMX0SL = amux;

    for(i = 0; i < 512; i++){
        // Protocolo para leitura do A/D
        AD0INT = 0;
        AD0BUSY = 1;
        while(AD0INT == 0);

        result += ADC0;
    }

    result = result >> 9;

    SFRPAGE = SFRPAGE_SAVE;              // Restore SFR page

    return result;
}

/*

```

```

Conversor DA
*/

//-----
// Includes
//-----
#include <c8051f120.h>
#include <stdio.h>
#include "controlador.h"

//-----
// Definicoes 16-bit SFR para 'F12x
//-----
sfr16 DAC1      = 0xd2;          // DAC1 data

//-----
// DAC1_Init
//-----
// Configura DAC1e ativa o VREF buffer.
//-----
void DAC1_Init(void){

    char SFRPAGE_SAVE = SFRPAGE;    // salva pagina corrente SFR

    SFRPAGE = DAC1_PAGE;

    DAC1CN = 0x84;                  // aciona dac1 justificado a direita

    SFRPAGE = LEGACY_PAGE;

    REF0CN |= 0x03;                  // Aciona VREF (2.4v)

    SFRPAGE = SFRPAGE_SAVE;          // Restaura SFR pag.
}

void setDAC1(int valor){
    char SFRPAGE_SAVE = SFRPAGE;    // Salva pagina corrente SFR
    char valorLow;
    char valorHigh;

    SFRPAGE = DAC1_PAGE;

    valorLow = valor << 4;
    valorHigh = valor >> 4;

    DAC1L = valorLow;
    DAC1H = valorHigh;

    SFRPAGE = SFRPAGE_SAVE;          // restaura SFR
}

//-----
// spi.c
//-----

```

```

//
// P2.0 - SPI SCK      (digital output, push-pull) Clock
// P2.1 - SPI MISO     (digital input, open-drain) Recebe dados
// P2.2 - SPI MOSI     (digital output, push-pull) Envio dos Dados
// P2.3 - SPI NSS      (digital output, push-pull) Selecionar ou habilitar o dispositivo

//-----
// Includes
//-----

#include <C8051F120.h>
#include "serial.h"
#include "controlador.h"
#include "spi.h"

//-----
// Definicoes de tipos
//-----

#ifndef BYTE
#define BYTE unsigned char
#endif

#ifndef UINT
#define UINT unsigned int
#endif

//-----
// Constantes
//-----

#define SYSCLK          24500000    //Frequencia do oscilador
#define SPI_CLOCK        50000000    // Clock maximo do Spi 500 kHz

int getTempSPI(){
int valorLido;

Delay_ms(100);
Delay_ms(100);
Delay_ms(100);

valorLido = SPI_Byte_Read();

return valorLido;
}

//-----
// SPI0_Init
//-----
// Configura o SPI para usar o modo 4-wire.
//
//-----
void SPI0_Init()
{
    unsigned char SFRPAGE_save = SFRPAGE; // Salva pagina SFRPAGE

```

```

    SFRPAGE = SPI0_PAGE;                // Altera SFRPAGE

    SPI0CFG  = 0x40;                    // Ativa o SPI como master

    SPI0CN   = 0x0D;                    // 4-wire Single Master, SPI ligado

    // Frequencia de clock do SPI
    SPI0CKR  = (SYSCLK/(2*SPI_CLOCK))-1;

    SFRPAGE = SFRPAGE_save;            // Restaura SFRPAGE
}

void iniciaSPI(){

    NSSMD0 = 1;
    Delay_ms(100);
    Delay_ms(100);
    Delay_ms(100);

}

//-----
// SPI_Byte_Read
//-----
// A leitura eh realizada em dois passos
// No primeiro passo envia o comando de leitura
//-----
int SPI_Byte_Read (void)
{
    BYTE byteHigh;
    BYTE byteLow;
    int valor;

    BYTE save_sfrpage = SFRPAGE;
    SFRPAGE  = SPI0_PAGE;

    // Passo 1

    NSSMD0  = 0;  // Aciona o sensor spi

    Delay_us(5);

    SPI0DAT = LM95071_CMD_READ;
    while (!SPIF);
    SPIF     = 0;
    byteHigh = SPI0DAT;
    Delay_us(5);

    // Passo 2
    SPI0DAT = 0x00; // Dummy write to output serial clock
    while (!SPIF);  // espera pela leitura
    SPIF      = 0;
    Delay_us(5);

```

```

NSSMD0    = 1;                // Desativa o sensor

Delay_us (5);

byteLow = SPI0DAT;            // guarda o valor lido

// junta os valores lidos
valor = (UINT)byteHigh << 8;
Delay_us(1);
valor += (UINT)byteLow;
Delay_us(1);
valor = valor >> 2;

SFRPAGE   = save_sfrpage;

return valor;
}

/*

Comunicacao Serial

*/

//-----
// Includes
//-----
#include <c8051f120.h>          // SFR declarations
#include <stdio.h>

//-----
// Global Constants
//-----

#define BAUDRATE    115200      // Baud rate da UART em bps
#define SYSCLK      24500000

// Envia os dados para o programa em labview
void setSerial(char letra, long valor){
char SFRPAGE_SAVE = SFRPAGE;

SFRPAGE = UART0_PAGE;

printf("%c%ld\n",letra, valor);

    SFRPAGE = SFRPAGE_SAVE;
}

void setSerialFloat(char letra, float valor){
char SFRPAGE_SAVE = SFRPAGE;
long teste;

SFRPAGE = UART0_PAGE;
valor = valor * 1000;

```

```

teste = (long)valor;

printf("%c%ld\n",letra, teste);

    SFRPAGE = SFRPAGE_SAVE;
}

//-----
// UART0_Init
//-----
// Configura UART) usando o Timer 1. Apos cofigurar os dados podem ser enviados
// utilizando a funcao printf
//-----
void UART0_Init (void)
{
    SFRPAGE = TIMER01_PAGE;

    CKCON |= 0x10;                // Aciona Timer1

    TCON &= ~0xC0;                // Para o Timer1; apaga TF1
    TMOD &= ~0xF0;                // Timer1 em modo 8-bit
    TMOD |= 0x20;

    TH1 = -(SYSCLK/BAUDRATE/16);  // configura taxa de relod
    TL1 = TH1;                    // init T1
    TR1 = 1;                      // Inicia Timer1

    SFRPAGE = UART0_PAGE;

    SCON0 = 0x50;                 // 8-bit taxa de transferencia;
                                // 9th bit ignored; RX ligado
                                // apaga todos flags
    SSTA0 = 0x10;                 // apaga todos flags; inicia baud rate
                                // doubler;

    TI0    = 1;                  // Indica se TX0 esta pronto
}

```