

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA ELETRÔNICA
ENGENHARIA ELETRÔNICA**

MARCELO ANTONIO PEDROSO

**PROJETO DO CONTROLE DIGITAL DE UM SISTEMA
INTERROGADOR DE GRADE DE BRAGG PARA MEDIDA DE
TEMPERATURA UTILIZANDO CIRCUITO ELETRÔNICO PARA
EMULAÇÃO DOS COMPONENTES ÓPTICOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**TOLEDO
JULHO-2015**

MARCELO ANTONIO PEDROSO

**PROJETO DO CONTROLE DIGITAL DE UM SISTEMA
INTERROGADOR DE GRADE DE BRAGG PARA MEDIDA DE
TEMPERATURA UTILIZANDO CIRCUITO ELETRÔNICO PARA
EMULAÇÃO DOS COMPONENTES ÓPTICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial a obtenção do título de Bacharel, em Engenharia Eletrônica, da Coordenação do Curso de Engenharia Eletrônica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Toledo.

Orientador: Prof. Dr. Felipe Walter Dafico Pfrimer

Co-orientador: Prof. Msc. Rodrigo da Ponte Caun

TOLEDO

JULHO-2015



TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso Nº 021

Projeto do Controle Digital de um Sistema Interrogador de Grade de Bragg para Medida de Temperatura Utilizando Circuito Eletrônico para Emulação dos Componentes Ópticos

por

Marcelo Antonio Pedroso

Esse Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 14:40 h do dia **25 de junho de 2015** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Eletrônica**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

Prof. M. Jaqueline Vargas
(UTFPR-TD)

Prof. Dr. Paulo de Tarso Neves Junior
(UTFPR-TD)

Prof. Dr. Felipe Walter Dafico Pfrimer
(UTFPR-TD)
Orientador

Visto da Coordenação

Prof. M. Alessandro Paulo de Oliveira
Coordenador da COELE

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus.

Um agradecimento especial ao meu orientador Prof. Dr. Felipe Walter Dafico Pfrimer, pela dedicação nesta trajetória, pelas orientações, pela enorme força de vontade em passar o conhecimento, pelo apoio e incentivo.

As pessoas que amo pelo incentivo, apoio, amor e compreensão.

Aos meus colegas de graduação.

Agradeço ao Prof. Dr. Paulo de Tarso Neves Junior por fornecer o código para geração do espectro de reflexão da FBG.

Ao Prof. Msc. Rodrigo da Ponte Caun por suas orientações e correções.

Aos meus professores por me passarem o conhecimento necessário para este trabalho.

E a todos que direta e indiretamente fizeram parte desta jornada, o meu muito obrigado.

“I seem to have been only like a boy playing on the sea-shore and diverting myself in now and then finding a smoother pebble or a prettier shell than ordinary, whilst the great ocean of truth lay all undiscovered before me.”

(ISAAC NEWTON).

“Tenho a impressão de ter sido uma criança brincando à beira-mar, divertindo-me em descobrir uma pedrinha mais lisa ou uma concha mais bonita que as outras, enquanto o imenso oceano da verdade continua misterioso diante dos meus olhos.”

(ISAAC NEWTON).

RESUMO

PEDROSO, Marcelo A. **Projeto do controle digital de um sistema interrogador de grade de Bragg para medida de temperatura utilizando circuito eletrônico para emulação dos componentes ópticos**. 2015. 79f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2015.

Este trabalho apresenta o projeto e programação, em linguagem C, do controle digital de um sistema interrogador de grade de Bragg para medida de temperatura. Para a validação e estudo do controle digital foi desenvolvido um circuito eletrônico para emular todos os componentes ópticos e através de uma interface, desenvolvida em LabVIEW®, foi possível visualizar os parâmetros do laser e da FBG. O emulador é utilizado para estudar o comportamento do sensor, além de garantir a integridade dos componentes ópticos durante os testes práticos, sem a necessidade de utilizar um sensor real.

Palavras-chave: Grades de Bragg. Sensor de temperatura. Fibras ópticas. Controle digital.

ABSTRACT

PEDROSO, Marcelo A. **Design of a digital control for a Bragg grating interrogator system to measure temperature using electronic circuit for emulation of optical components**. 2015. 79f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica) – Federal University of Technology. Toledo, 2015.

This paper presents the design and programming in C language of the digital control for a Bragg grating interrogator system for temperature measurement. In order to validate the study of the digital control, it was developed an electronic circuit to emulate all optical components and through an interface developed in LabVIEW®, it was possible to define the parameters of the laser and the FBG. The emulator might be used to study different sensor configurations and to ensure the integrity of the optical components during practical tests, without the requirement to use a real sensor.

Palavras-chave: Fiber Bragg grating. Temperature sensor. Optical fibers. Digital control.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estrutura de uma FBG construída em fibra monomodo.	19
Figura 2 – Mecanismo de operação de uma FBG com fonte de espectro largo.....	20
Figura 3 – Efeito da variação de temperatura em um sensor a FBG.	22
Figura 4 – Configuração reflectométrica para interrogação usando OC.	23
Figura 5 – Sistema de interrogação utilizando um laser.....	23
Figura 6 – Diagrama de blocos da técnica de interrogação realimentada.....	25
Figura 7 – Laser sintonizável sob o ponto de operação do espectro da FBG.	26
Figura 8 – Diagrama de blocos de um sistema de controle digital.	27
Figura 9 – Diagrama da técnica de interrogação realimentada com emulador.	32
Figura 10 – Circuito de Alimentação do TEC.	34
Figura 11 – PCB do Termistor.....	35
Figura 12 – Acoplamento Termistor-TEC-Dissipador.....	36
Figura 13 – Espectro de reflexão da FBG normalizado.....	38
Figura 14 – Organização dos pontos do espectro da FBG no emulador.....	40
Figura 15 – Representação da interpolação para encontrar o ponto de convolução.....	42
Figura 16 – Circuito emulador do fotodiodo e amplificador de transimpedância.	43
Figura 17 – Diagrama de blocos do sistema de controle.	44
Figura 18 – Circuito de Controle.....	45
Figura 19 – Buffer de comunicação.....	46
Figura 20 – Protótipo do sistema.....	47
Figura 21 – Fluxograma do Controlador.....	49
Figura 22 – Fluxograma do Emulador.	51
Figura 23 – Fluxograma da Interface.	52
Figura 24 – Espectros do laser em 25 °C e da FBG em 25 °C.....	54
Figura 25 – Espectros do laser em 15 °C e da FBG em 25 °C.....	55
Figura 26 – Espectros do laser em 21,163 °C e da FBG em 25 °C.....	55
Figura 27 – Resposta do controlador PID com temperatura ambiente de 25 °C e temperatura da FBG definida em 25 °C.	56
Figura 28 – Resposta do PID com temperatura ambiente de 22 °C.....	57
Figura A.29 – Esquemático do Emulador – Parte 1.	64
Figura A.30 – Esquemático do Emulador – Parte 2.	65

Figura A.31 – Esquemático do Controlador – Parte 1.....	65
Figura A.32 – Esquemático do Controlador – Parte 2.....	66
Figura A.33 – Esquemático do Controlador – Parte 3.....	67
Figura B.34 – Diagrama da Interface no Estado Inicial.....	69
Figura B.35 – Diagrama da Interface no Estado 1.....	69
Figura B.36 – Diagrama da Interface no Estado 2.....	70
Figura B.37 – Diagrama da Interface no Estado 3.....	70
Figura B.38 – Diagrama Auxiliar para cálculos.....	70
Figura B.39 – Painel Frontal da Interface.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Testes realizados para observar os tempos de interrogação.	57
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

A ₁	Amplificador de Transimpedância
ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
DAC	<i>Digital-to-Analog Converter</i>
DFB	<i>Distributed Feedback</i>
PD	Fotodiodo
FWHM	<i>Full Width at Half Maximum</i>
FBG	Grade de Bragg em fibra (em inglês <i>Fiber Bragg Grating</i>)
µC	Microcontrolador
NTC	<i>Negative Temperature Coefficient</i>
OC	<i>Optical Coupler</i>
OSA	<i>Optical Spectrum Analyzer</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
SMD	<i>Surface-mount Device</i>
TEC	<i>Thermoelectric Cooler</i>
UART	<i>Universal asynchronous receiver/transmitter</i>
ZOH	<i>Zero Order Hold</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

λ_B	Comprimento de onda de Bragg (m)
n	Índice de refração do núcleo da fibra óptica
n_{cl}	Índice de refração do núcleo do revestimento da fibra
Λ	Período da FBG (m)
n_{eff}	Índice de refração efetivo
T	Temperatura (K ou °C)
α_n	Coefficiente termo-óptico (K ⁻¹)
α_A	Coefficiente de expansão térmica (K ⁻¹)
K_T	Sensibilidade térmica da FBG (m°C ⁻¹)
λ_0	Comprimento de onda do laser DFB sintonizável de espectro fino (m)
V_{TH}	Tensão do termistor (V)
V_{FBG}	Tensão proporcional à intensidade luminosa refletida pela grade (V)
T_s	Tempo de amostragem (s)
$\delta[n]$	Função delta
Δn	Varição do índice de refração no núcleo
R_{TH}	Resistência do termistor (Ω)
T_0	Temperatura do laser (°C)
R_{25}	Resistência do termistor em 25 °C (Ω)
R_0	Resistência do divisor resistivo com o termistor (Ω)
T_{25}	Temperatura ambiente (°C)
β	Beta do termistor
V_{refD}	Tensão de referência do divisor resistivo com o termistor (V)
$\Delta\lambda$	Varição do comprimento de onda da FBG amostrada (m)

$\Delta\lambda_B$	Varição do comprimento de onda de Bragg (m)
$\Delta\lambda_0$	Varição do comprimento de onda do laser (m)
ΔT_0	Varição da temperatura do laser (°C)
ΔT_B	Varição da temperatura da grade (°C)
λ_{B_INIT}	Comprimento de onda onde inicia-se o perfil amostrado da FBG (m)
i	Índice do vetor de pontos do perfil de reflexão da FBG amostrado
I_{PD}	Corrente do fotodiodo (A)
S_L	Sensibilidade térmica do laser (nm/°C)
T_{ref0}	Temperatura de referência do laser (°C)
T_{ref}	Temperatura de referência (°C)
T_B	Temperatura do sensor óptico (°C)
K_p	Constante do proporcional
K_d	Constante do derivativo
K_i	Constante do integral

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 JUSTIFICATIVA	16
1.2 OBJETIVOS	17
2 REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 GRADE DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA (FBG)	18
2.2 COMPORTAMENTO DA FBG EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.....	20
2.3 FBG COMO SENSOR DE TEMPERATURA.....	21
2.4 TÉCNICAS DE INTERROGAÇÃO	22
2.4.1 Descrição da Técnica de Interrogação Utilizada	24
2.5 CONTROLE DIGITAL	27
2.5.1 Implementação Digital do Controlador PID	28
2.5.1.1 Ação Proporcional	28
2.5.1.2 Ação Integral	29
3 METODOLOGIA	32
3.1 EMULADOR DOS COMPONENTES ÓPTICOS	33
3.1.1 Emulação do Laser	33
3.1.1.1 Comportamento do Termistor.....	33
3.1.1.2 Comportamento do TEC.....	34
3.1.1.3 Acoplamento TEC e Termistor	35
3.1.1.4 Emulação do comportamento espectral do laser	36
3.1.2 Emulação da FBG e Espectro de Reflexão	37
3.1.3 Emulação do Comportamento de Reflexão da FBG	39
3.1.3.1 Convolução	39
3.1.3.2 Algoritmo de Convolução	40
3.1.4 Emulação do Fotodiodo.....	42
3.2 PROJETO DO CONTROLADOR DIGITAL	43
3.3 INTERFACE	45
3.3.1 Protocolo de Comunicação	46
3.4 CIRCUITOS DO EMULADOR E CONTROLADOR.....	46
3.5 FUNCIONAMENTO DO SISTEMA	48

3.5.1 Funcionamento do Controlador	48
3.5.2 Funcionamento do Emulador	50
3.5.3 Funcionamento da Interface	51
4 RESULTADOS	54
5 CONCLUSÕES.....	59
5.1 TRABALHOS FUTUROS.....	60
REFERÊNCIAS.....	61
APÊNDICE A – ESQUEMÁTICOS DOS CIRCUITOS ELETRÔNICOS	63
APÊNDICE B – INTERFACE E DIAGRAMAS DE BLOCOS	68
APÊNDICE C – CÓDIGOS FONTE UTILIZADOS	72

1 INTRODUÇÃO

Com a descoberta da fotossensibilidade em fibras ópticas um novo tipo de componente óptico foi desenvolvido, chamado de grades de Bragg (FBG do inglês Fiber Bragg Grating). Este dispositivo é capaz de realizar funções tais como reflexão e filtragem de maneira eficiente e com baixas perdas (OTHONOS; KALLI, 1999).

Uma FBG consiste em uma modulação periódica do índice de refração ao longo do núcleo da fibra. Essa modulação do índice de refração tem o efeito de refletir parte do espectro luminoso centrado em um determinado comprimento de onda chamado de comprimento de onda de Bragg (λ_B), gerando um espectro de reflexão (OTHONOS; KALLI, 1999). A FBG possui a propriedade de modificar suas características de filtragem através de perturbações externas como temperatura, pressão ou deformação (NEVES JR, 2008).

A crescente utilização desse dispositivo em sistemas de sensores pode ser explicada por algumas de suas características, como: imunidade à interferência eletromagnética, baixo peso, flexibilidade, transmissão de informação a longa distância e, em alguns casos, tolerância a altas temperaturas (PFRIMER, 2013).

Devido às suas propriedades e características, a FBG vem sendo amplamente utilizada em sistemas de sensoriamento. Um exemplo de aplicação de tais sensores é a medição de temperatura em diversos pontos no interior de um transformador de alta potência, onde a interferência eletromagnética impede o uso de sensores convencionais, tais como termopares. Também há aplicações na indústria petrolífera (MORIKAWA *et al.*, 2008), na medida de tensão e temperatura em linhas de transmissão (ALLIL, 2010), entre demais outras aplicações.

A literatura apresenta técnicas de interrogação que realizam uma medida em malha aberta do espectro de reflexão da FBG (ou simplesmente espectro da FBG) verificando o valor do comprimento de onda de Bragg. No entanto, medidas em malha fechada, onde um controlador segue a posição do espectro da FBG, se mostram mais precisas (OTHONOS; KALLI, 1999).

Em 2009, DA COSTA propôs uma nova técnica para interrogar um sensor FBG através de uma malha de realimentação, associada a um controlador analógico

Proporcional-Integral-Derivativo (PID), para que um laser de realimentação distribuída (DFB em inglês *Distributed feedback*) siga o espectro da FBG.

Apesar do bom resultado, o sistema desenvolvido por DA COSTA era capaz de medir apenas um sensor FBG, sendo necessário mais de um circuito de controle PID analógico para interrogar uma rede de sensores FBGs.

Sendo assim, substituindo o circuito de controle analógico por um sistema de controle digital é possível realizar a medida de uma rede sensores utilizando apenas um circuito (PFRIMER *et al.*, 2013).

Para a realização do controle digital faz-se o uso de um computador ou microcontrolador, além disso, é também necessário um conversor analógico - digital (ADC, em inglês *Analog-to-Digital Converter*) e um conversor digital - analógico (DAC, em inglês *Digital-to-Analog Converter*) (PEREIRA; SPILLER, 2014).

1.1 JUSTIFICATIVA

O controle digital, além de reduzir o custo do projeto, proporciona a flexibilidade para realizar mudanças no projeto. Tais mudanças podem ser implementadas através de ajustes no firmware, em vez de mudar os componentes do circuito (NISE, 2009). Essa flexibilidade torna o controle digital desejável para a implementação da técnica de interrogação realimentada, podendo assim realizar adaptações do controlador na fase de testes do projeto, tendo em vista a dificuldade na obtenção do modelo matemático do sistema e consequentemente a utilização da forma empírica na definição dos parâmetros do controlador digital.

Adicionalmente, pode-se substituir os componentes ópticos por um emulador eletrônico e uma interface para estudar o comportamento do sensor e assim garantir a integridade dos componentes ópticos durante os testes práticos, sem a necessidade de utilizar um sensor real.

Com a interface pode-se alterar virtualmente a temperatura do sensor da forma que o projetista preferir e realizar os testes práticos de forma mais rápida, sem a necessidade de uma câmara térmica com controle de temperatura, além disso a interface e o emulador possibilitam observar o comportamento do controlador.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo realizar o projeto e programação, em linguagem C, do controle digital de um sistema interrogador de grades de Bragg, para a medida de temperatura. O controle digital tem como objetivo fazer um laser DFB seguir o espectro de uma FBG sobre um determinado ponto de operação (mais detalhes da técnica serão abordados na Seção 2.4).

Para a validação e estudo do controle digital será desenvolvido um circuito eletrônico para emular todos os componentes ópticos e através de uma interface, desenvolvida em LabVIEW®, será possível alterar a temperatura do sensor e visualizar o comportamento do controlador em tempo real.

Especificamente os objetivos deste trabalho são:

- I. Desenvolver um emulador dos componentes ópticos (Laser, acoplador óptico, FBG), através de um circuito eletrônico;
- II. Desenvolver uma interface no software LabVIEW® para observar o comportamento do controle digital e alterar virtualmente a temperatura do sensor;
- III. Realizar um protocolo de comunicação entre LabVIEW® e os microcontroladores;
- IV. Projetar o circuito eletrônico do emulador;
- V. Programar o firmware do controlador e emulador em linguagem C;
- VI. Projetar um controlador digital PID para fazer o laser DFB seguir o espectro da FBG.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este trabalho aborda grades de Bragg em fibras ópticas e sua aplicação em sensoriamento de temperatura. O termo interrogar, em sistemas que utilizam FBGs como sensores, significa extrair o valor da grandeza desejada através da medição da posição espectral de tais dispositivos. Dessa forma, em muitos trabalhos relacionados, é comum encontrar a expressão “sistema de interrogação” para designar esses métodos.

A técnica abordada neste trabalho foi proposta por PFRIMER *et al.* em 2013. Por se tratar de um método em malha fechada necessita da programação de um controle digital, o qual é um dos objetivos desse trabalho. Dessa forma, nas próximas seções serão apresentados conceitos teóricos relevantes para a programação do controlador digital e para o entendimento do sistema de interrogação utilizado, bem como para a construção do emulador eletrônico do sistema óptico.

2.1 GRADE DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA (FBG)

Em 1978, no *Communication Research Center* no Canadá, Ken Hill *et al.* durante seus experimentos constataram a fotossensibilidade em fibras ópticas. Este fenômeno se refere a uma mudança permanente no índice de refração do núcleo da fibra quando exposto à luz com comprimento de onda e intensidade característicos (OTHONOS; KALLI, 1999).

Sendo assim, a FBG (construída dentro de uma fibra óptica monomodo) é um dispositivo que consiste em uma modulação periódica do índice de refração do núcleo da fibra (DANTE, 2012). Esse dispositivo pode ser visto como um filtro óptico passa-banda na reflexão, e rejeita-banda na transmissão, e possui a propriedade de modificar suas características de filtragem ao sofrer perturbações externas como pressão, temperatura ou deformação (NEVES JR, 2008). A Figura 1 mostra a estrutura de uma FBG em uma fibra óptica monomodo com comprimento L ao longo do eixo z . O núcleo da fibra (em inglês *fiber core*) e seu revestimento (*cladding*) possuem índice de refração n e n_{cl} , respectivamente.

A FBG uniforme apresenta um espectro de índice axial de acordo com a equação (2.1) (PFRIMER, 2013),

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

onde Δn é a variação no índice de refração do núcleo da fibra e Λ é o período da grade, ou seja, a distância física entre os planos da grade.

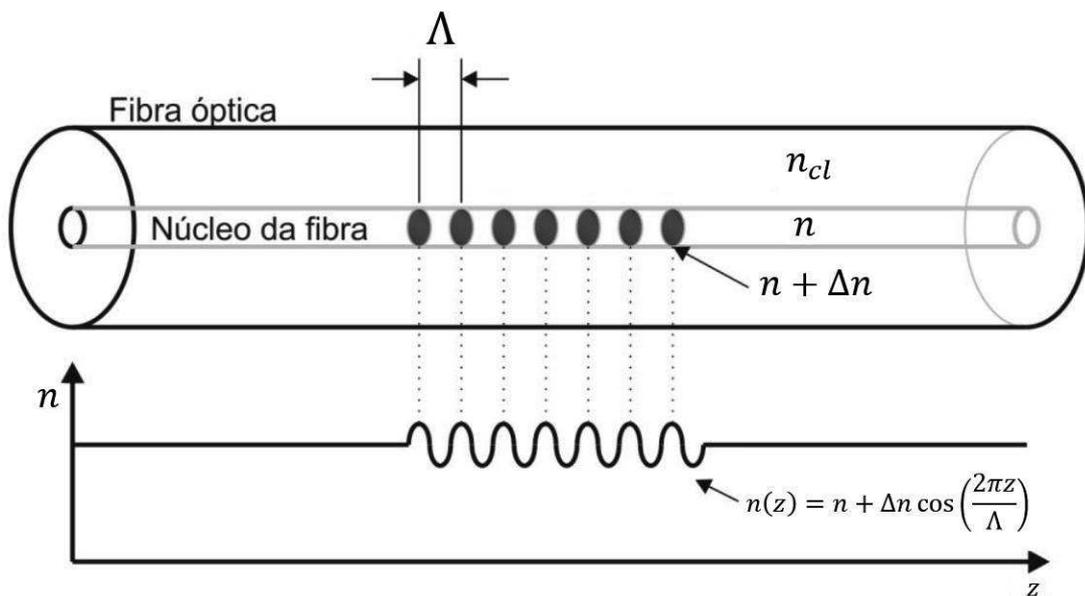


Figura 1 – Estrutura de uma FBG construída em fibra monomodo.

A modulação periódica de n possui o efeito de refletir parte do espectro luminoso, conforme mostra a Figura 2, e este é centrado em um comprimento de onda conhecido como comprimento de onda de Bragg λ_B (PFRIMER, 2013), dado por:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda, \quad (2.2)$$

no qual n_{eff} é definido como sendo o índice de refração efetivo do núcleo da fibra.

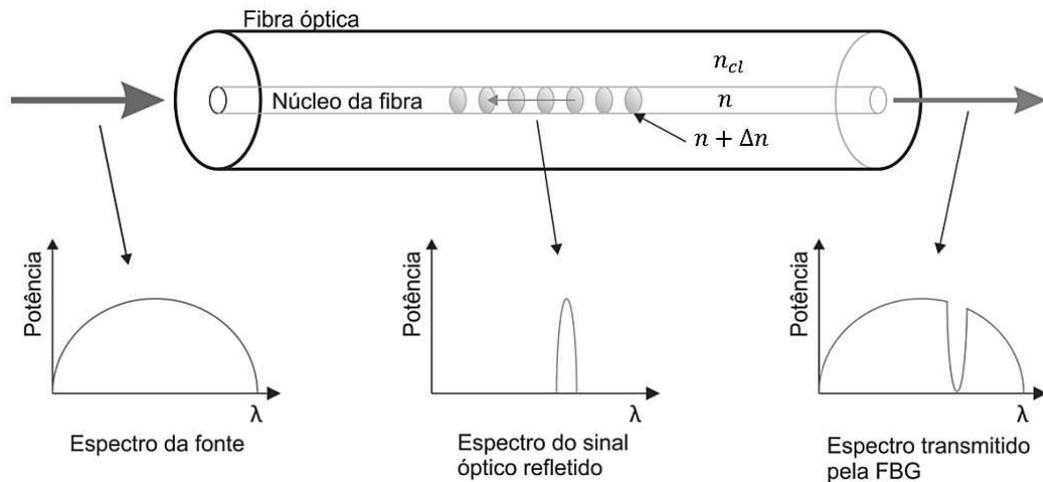


Figura 2 – Mecanismo de operação de uma FBG com fonte de espectro largo.

2.2 COMPORTAMENTO DA FBG EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

A FBG é sensível às variações de temperatura e de deformação e λ_B é dependente dessa variação. Para uma FBG com padrão de modulação uniforme do índice de refração n inscrita em uma fibra óptica monomodo as contribuições da variação de temperatura são em torno de $0,01 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ para um valor de λ_B centrado em 1550 nm (HILL; MELTZ, 1997).

Assim, a expressão geral para o deslocamento do λ_B em função da variação de temperatura (ΔT) e da variação do comprimento da rede de Bragg (ΔL) é obtida diferenciando a equação (2.2) (NEVES JR, 2008), resultando em:

$$\Delta\lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T + 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial L} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial L} \right) \Delta L \quad (2.3)$$

No presente trabalho será feito o sensoriamento somente da temperatura, sendo assim pode-se desconsiderar o parâmetro de deformação, ou seja, a equação (2.3) pode ser reduzida e ser reescrita como:

$$\Delta\lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T \quad (2.4)$$

Dividindo a equação (2.4) pela equação (2.2) resulta em:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left(\frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T. \quad (2.5)$$

O termo $(1/n_{eff})(\partial n_{eff}/\partial T)$ representa o coeficiente termo-óptico α_n . O segundo termo $(1/\Lambda)(\partial \Lambda/\partial T)$ representa o coeficiente de expansão térmica α_Λ (PFRIMER, 2013).

A soma dos coeficientes $\alpha_n + \alpha_\Lambda$ resulta na sensibilidade térmica da FBG (K_T). Um valor típico para esta sensibilidade térmica é $6,7 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ (HILL; MELTZ, 1997).

Sendo assim, pela equação (2.5) pode-se obter a seguinte equação do deslocamento de λ_B em função da temperatura:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = K_T \Delta T. \quad (2.6)$$

Pode-se observar que o comprimento de onda de Bragg estabelece uma relação linear com a variação da temperatura conforme mostrado pela equação (2.6).

2.3 FBG COMO SENSOR DE TEMPERATURA

Como apresentado na seção 2.2, a FBG é sensível às variações de temperatura. Quando isso ocorre, λ_B se desloca devido à alteração do Λ e/ou do índice de refração da FBG.

Para caracterizar uma FBG como sensor pode-se utilizar uma fonte de luz de espectro largo que abrange todos os comprimentos de onda da FBG.

De acordo com Dante (2012), um aumento na temperatura irá deslocar a FBG para comprimentos de onda maiores. Da mesma forma, uma diminuição na temperatura fará com que o comprimento de onda da FBG se desloque para comprimentos de onda menores, a Figura 3 ilustra este fenômeno.

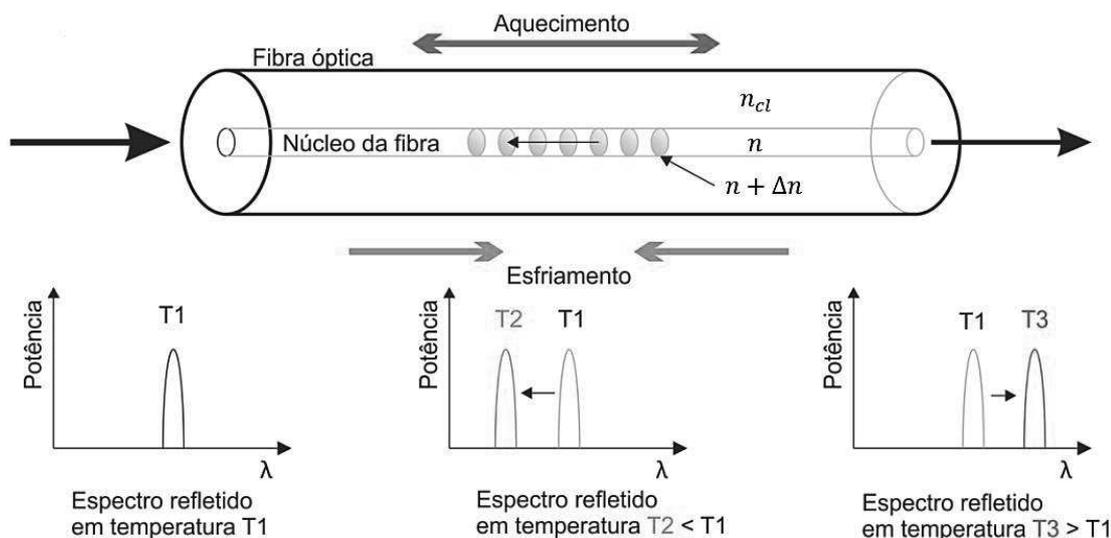


Figura 3 – Efeito da variação de temperatura em um sensor a FBG.

Sensores a FBG são atualmente empregados na medida de temperatura, deformação. Tais sensores baseiam-se na detecção do deslocamento do λ_B causado pela variação de temperatura e da deformação (DANTE, 2012).

2.4 TÉCNICAS DE INTERROGAÇÃO

A interrogação (também conhecida como demodulação) de um sensor a FBG pode ser realizada por diferentes técnicas. Uma das mais simples utiliza-se de um analisador espectro óptico (OSA em inglês *optical spectrum analyzer*). Essa técnica é bastante utilizada em laboratórios para análises experimentais e calibração de um sensor a FBG. Um OSA possui uma resolução na ordem de 1 pm, porém, é um equipamento de custo muito elevado (PFRIMER, 2013).

A principal forma de interrogar um sensor a FBG consiste no uso de uma fonte de luz de espectro largo que abrange toda a região de operação do sensor, quando o mesmo está exposto a perturbações externas. O espectro óptico refletido do sensor é, então, direcionado para o sistema de detecção de comprimento de onda (OSA, filtros ou detecção interferométrica).

A luz refletida atinge geralmente o sistema de detecção através de um, acoplador óptico, OC (*Optical Coupler*), mas, em alguns casos, um circulador óptico é usado (PFRIMER, 2013). A Figura 4 apresenta a configuração reflectométrica em uma rede de sensores.

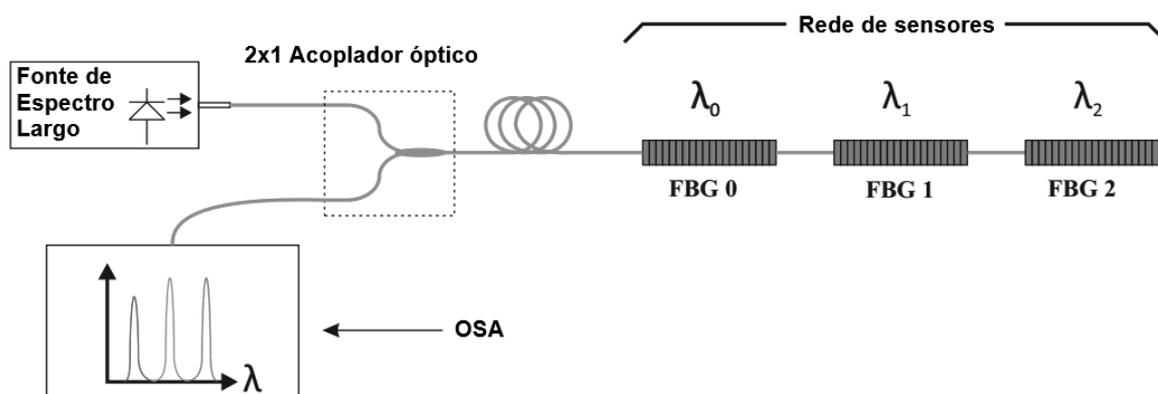


Figura 4 – Configuração reflectométrica para interrogação usando OC.
Fonte: PFRIMER (2013).

Como o OSA é um equipamento de custo muito alto, há a necessidade de substituí-lo em sistemas práticos. Sendo assim, a maioria das técnicas de interrogação se utilizam de interferômetros, filtros passivos e ativos (filtros sintonizáveis) e fonte de luz sintonizável (PFRIMER, 2013).

Alternativamente, pode-se utilizar fontes de espectro estreito sintonizáveis (ou lasers) para a interrogação dos sensores FBG. Neste caso, a máxima reflexão ocorre quando o laser e o sensor estão sintonizados no mesmo comprimento de onda. A Figura 5 ilustra o esquema de um sistema utilizando uma fonte de espectro estreito.

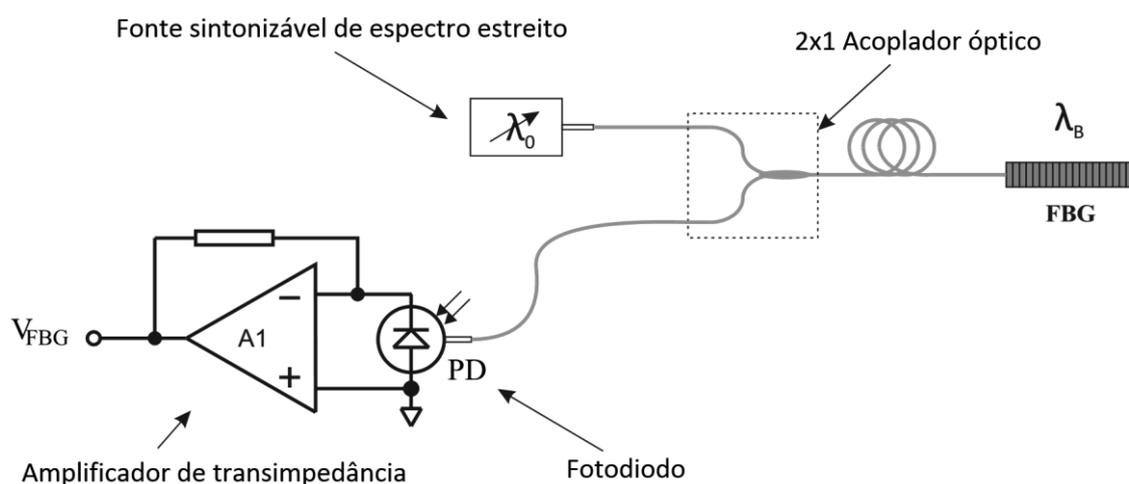


Figura 5 – Sistema de interrogação utilizando um laser.
Fonte: PFRIMER (2013).

Pode-se perceber no esquema da Figura 5 que um fotodiodo (PD) é utilizado para detectar a luz refletida pela FBG. A corrente gerada pelo fotodiodo é convertida

em tensão através do amplificador de transimpedância (A_1), gerando a tensão de saída V_{FBG} .

A temperatura do sensor pode ser estimada variando a posição espectral do laser e procurando pelo ponto de maior tensão de saída (maior reflexão). Neste ponto, o comprimento de onda central da FBG é igual ao do laser e a temperatura pode ser calculada de acordo com a equação (2.6).

Uma malha de realimentação pode ser projetada para manter o laser constantemente sobre a região de maior reflexão e dessa forma, permitir uma leitura constante e mais precisa da temperatura.

2.4.1 Descrição da Técnica de Interrogação Utilizada

A técnica de interrogação utilizada, e proposta por PFRIMER *et al.* (2013), é semelhante ao esquema da Figura 5. Como pode ser observado, esta técnica utiliza uma malha de realimentação digital onde um microcontrolador (μC) realiza as rotinas de controle. A Figura 6 mostra um diagrama deste sistema.

Como fonte de luz sintonizável de espectro estreito pode-se utilizar um laser DFB. Neste tipo de laser há embutido um módulo termoelétrico (TEC em inglês *thermoelectric cooler*). Este é usado para sintonizar o espectro do laser.

A faixa sintonizável de lasers DFB é da ordem de 6 nm para uma variação de 50 °C na temperatura (PFRIMER, 2013).

O TEC é baseado no Efeito Peltier, onde, ao aplicar uma corrente contínua sobre seus terminais, ele irá funcionar como uma bomba de calor, transportando energia térmica de uma de suas faces para a outra. Dessa forma, o TEC pode ser utilizado para aquecer ou esfriar o laser. Como o comprimento de onda do laser varia linearmente com a temperatura, a sintonia é feita controlando a temperatura do laser através da corrente que passa pelo TEC.

A dependência do comprimento de onda de lasers DFB comerciais com a temperatura é fornecida pelo fabricante em sua folha de dados.

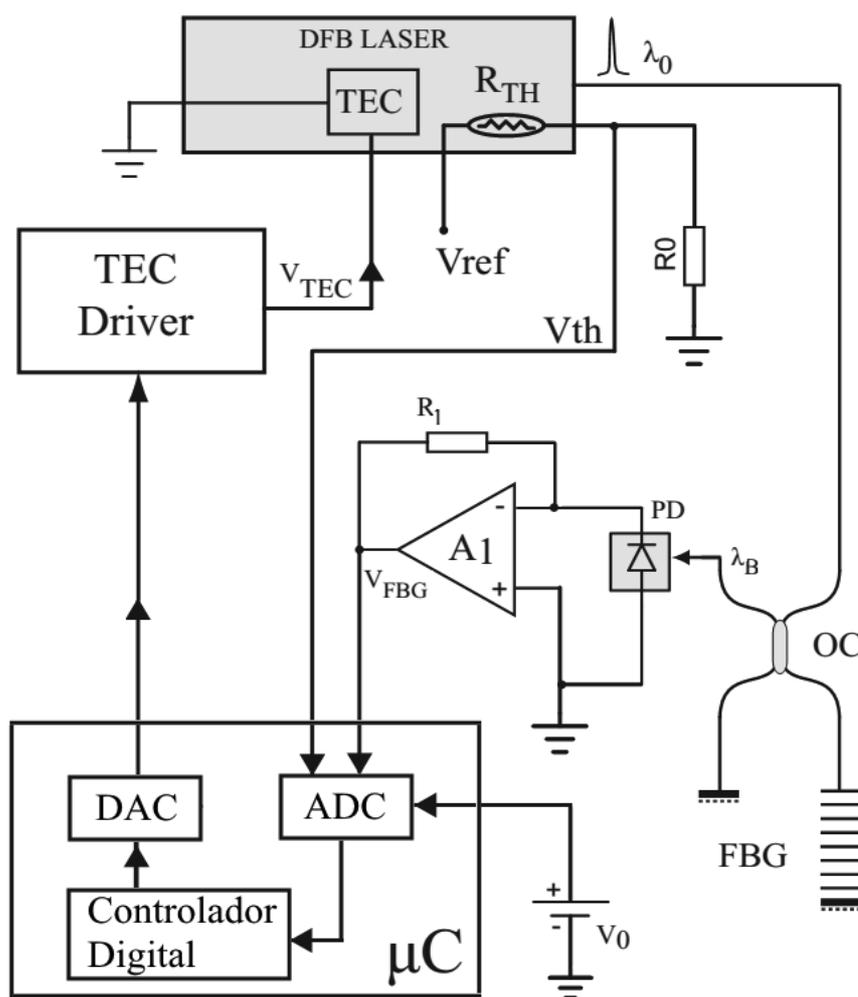


Figura 6 – Diagrama de blocos da técnica de interrogação realimentada.
Fonte: PFRIMER *et. al.* (2013).

Outro componente constituinte do laser é o termistor (R_{TH}), um resistor que varia com a temperatura (DA COSTA, 2009), que é utilizado para medir a temperatura interna do laser, e dessa forma, determinar sua posição espectral.

Na Figura 6, o laser, com comprimento de onda λ_0 , incide luz na FBG e o fotodiodo (PD) recebe o espectro refletido pela grade e converte em corrente. A corrente gerada por PD é convertida em tensão pelo amplificador de transimpedância A_1 . A tensão V_{FBG} é proporcional à intensidade de luz refletida, que pode ser vista na parte hachurada da Figura 7. Esta intensidade pode ser definida como a convolução entre o espectro da FBG e o espectro do laser. Um ADC (conversor analógico-digital) é necessário para ler essa tensão, assim como a tensão em cima do termistor do laser, V_{TH} . A tensão do termistor indica em qual comprimento de onda se encontra o laser.

A temperatura da FBG pode ser obtida fazendo o laser seguir um determinado ponto de operação sobre o espectro da FBG, como pode ser visto na Figura 7. Este ponto pode ser escolhido em uma das duas regiões laterais do espectro da FBG onde uma pequena variação do comprimento de onda resulta em uma grande variação da potência refletida, resultando em uma grande variação da tensão V_{FBG} . Para este projeto, o ponto de operação foi escolhido de acordo com a Figura 7 onde a derivada da potência refletida em relação ao comprimento de onda (λ) é positiva.

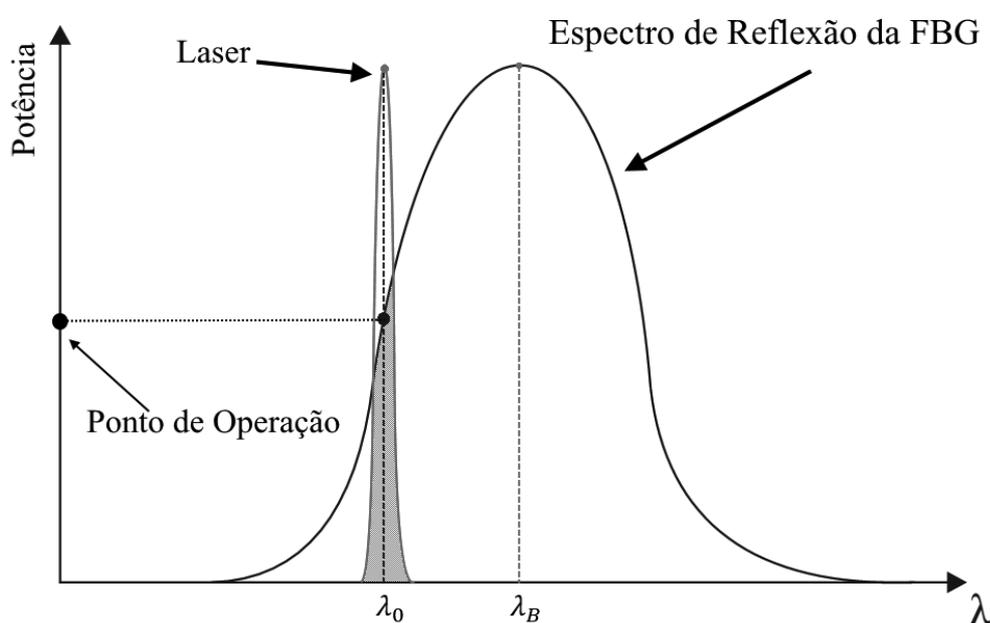


Figura 7 – Laser sintonizável sob o ponto de operação do espectro da FBG.
Fonte: PFRIMER (2013).

Para fazer o espectro do laser seguir o espectro da FBG no ponto de operação é utilizado um controlador digital programado em um microcontrolador que irá verificar a intensidade de luz refletida e comparar com o valor do ponto de operação, gerando um sinal de erro. Em seguida o controlador irá atuar sobre o TEC do laser, através de um DAC que enviará um sinal de corrente para um driver de potência (TEC Driver), que fornecerá corrente para o TEC fazendo com que λ_0 varie sobre o espectro (PFRIMER, 2013).

Quando o sinal de erro for muito pequeno, ou seja, quando o espectro do laser se encontrar em torno do ponto de operação, pode-se realizar a interrogação do sistema.

2.5 CONTROLE DIGITAL

Como dito anteriormente, o uso de sistemas digitais em malha de controle traz grandes vantagens, a mais importante é a flexibilidade para realizar mudanças no projeto. Outra vantagem é a possibilidade da supervisão dos dados e armazenamento das variáveis do processo.

Para a implementação do controle digital é necessário o uso de um computador, microcontrolador ou dispositivo lógico programável. A Figura 8 mostra um diagrama de blocos de um sistema com controlador digital.

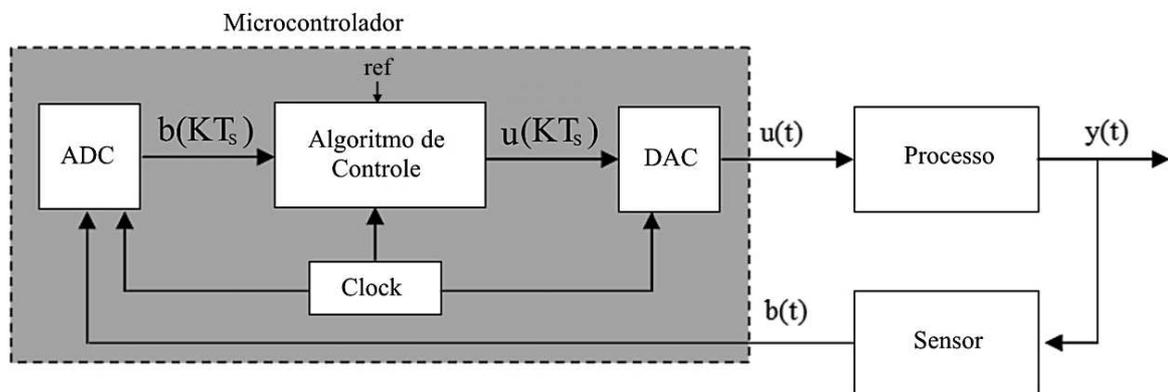


Figura 8 – Diagrama de blocos de um sistema de controle digital.
Fonte: PEREIRA; SPILLER (2014).

No diagrama de blocos acima pode-se observar que os sinais $b(kT_s)$ e $u(kT_s)$ são os equivalentes no tempo discreto de $b(t)$ e $u(t)$ respectivamente, onde $b(t)$ é o sinal do sensor e $u(t)$ é o sinal de controle.

O algoritmo de controle é composto por um código, geralmente em linguagem de programação C, que representa uma ação de controle discretizada que é responsável pelo processamento do sinal $b(kT_s)$ de forma a gerar o sinal de controle $u(kT_s)$.

O Clock é responsável pelo sincronismo entre os demais blocos que constituem o computador (PEREIRA; SPILLER, 2014). O ADC realiza a amostragem em um tempo de amostragem denominado T_s .

O Algoritmo de Controle pode ser implementado por uma estrutura de controle proporcional-integral-derivativo ou simplesmente PID.

A seguir será apresentado um método para o projeto de um controlador PID digital.

2.5.1 Implementação Digital do Controlador PID

O controlador pode ser compreendido como um dispositivo que realiza ações de controle sobre o sinal de erro $e(t)$ a fim de gerar um sinal de controle $u(t)$ a ser aplicado sobre a planta do processo com objetivo de realizar o seu controle. Estas ações de controle podem ser: Proporcional (P); Integral (I); Derivativa (D). A combinação das ações de controle proporcional, integral e derivativa geram um sinal de controle, no qual, dá origem ao controlador proporcional-integral-derivativo,

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right), \quad (2.7)$$

sendo K o ganho proporcional, T_i o tempo integral e T_d o tempo derivativo, assume-se ainda que T_s seja convenientemente escolhido de forma a satisfazer o Teorema de Nyquist. O sinal de controle será utilizado nos instantes de tempo $t_k = kT_s$, ou simplificadaamente a saída do processo, o sinal de referência, o sinal de controle e o sinal de erro no instante t_k serão denotados como $y(k)$, $r(k)$, $u(k)$ e $e(k)$, respectivamente.

2.5.1.1 Ação Proporcional

A ação proporcional reduz o erro, mas, não o torna nulo, e quanto maior é o ganho do proporcional menor é o erro, mas, com isso o sistema se torna oscilatório podendo levar a instabilidade do sistema. Esta ação discretizada no instante k é representada por (SILVA JR; BAZANELLA, 2000):

$$P(k) = K(r(k-1) - y(k-1)) = K(e(k-1)) \quad (2.8)$$

2.5.1.2 Ação Integral

O integral está ligado a melhoria do erro em regime permanente, fazendo com que o erro seja nulo ou aproximadamente nulo sem que o sistema seja instável. Esta ação insere um pólo na origem e além de garantir um erro pequeno ainda reduz as perturbações do sistema, porém não é utilizado separadamente. A ação integral é representada por:

$$I(t) = \frac{K}{T_i} \int_0^t e(t) dt , \quad (2.9)$$

e, aplicando a transformada de Laplace, resulta em:

$$I(s) = \frac{K}{T_i s} E(s) \quad (2.10)$$

Há várias maneiras de realizar uma aproximação discreta da equação (2.10), porém, no presente trabalho será utilizada a aproximação pelo método de Tustin, pois, este método de aproximação garante que um sistema estável no domínio contínuo também seja estável no domínio discreto (PEREIRA; SPILLER, 2014). A aproximação de Tustin estabelece a relação entre as variáveis z e s da seguinte forma:

$$s = \frac{2}{T_s} \left(\frac{z-1}{z+1} \right) \quad (2.11)$$

Aplicando a aproximação de Tustin na equação (2.10) resulta na equação (2.12),

$$\frac{I(z)}{E(z)} = K \frac{T_s}{2T_i} \left(\frac{z+1}{z-1} \right), \quad (2.12)$$

que pode ser representada pela seguinte equação de recorrência:

$$I(k) = I(k - 1) + K \frac{T_s}{T_i} \left(\frac{e(k - 1) + e(k)}{2} \right). \quad (2.13)$$

O termo $K T_s / T_i$ pode ser reescrito simplesmente por K_i . Assim substituindo na equação (2.13), resulta em (SILVA JR; BAZANELLA, 2000):

$$I(k) = I(k - 1) + K_i \left(\frac{e(k - 1) + e(k)}{2} \right) \quad (2.14)$$

2.5.1.3 Ação Derivativa

A ação derivativa é antecipatória ou preditiva fazendo com que o sistema seja mais rápido fazendo com que o sobressinal do sistema diminua.

A ação derivativa é representada por:

$$D(t) = K T_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (2.15)$$

e, aplicando a transformada de Laplace, obtém-se:

$$\frac{D(s)}{E(s)} = K T_d s \quad (2.16)$$

Aplicando a aproximação pelo método de Tustin na equação (2.16) resulta em:

$$\frac{D(Z)}{E(Z)} = \frac{2K T_d}{T_s} \left(\frac{Z - 1}{Z + 1} \right), \quad (2.17)$$

que pode ser representada pela seguinte equação de recorrência:

$$D(k) = \frac{2KT_d}{T_s}(e(k) - e(k - 1)) - D(k - 1) \quad (2.18)$$

O termo $2K^{T_d}/T_s$ pode ser reescrito simplesmente por K_d , substituindo na equação (2.18), resulta em (SILVA JR; BAZANELLA, 2000):

$$D(k) = K_d(e(k) - e(k - 1)) - D(k - 1) \quad (2.19)$$

3 METODOLOGIA

Na Seção 2.4.1, a Figura 6 apresenta o diagrama de blocos da técnica de interrogação realimentada com os componentes ópticos.

Um dos objetivos desse trabalho é a emulação destes componentes. Sendo assim, um novo diagrama, esquematizado na Figura 9, demonstra a realização da técnica de interrogação realimentada com o emulador.

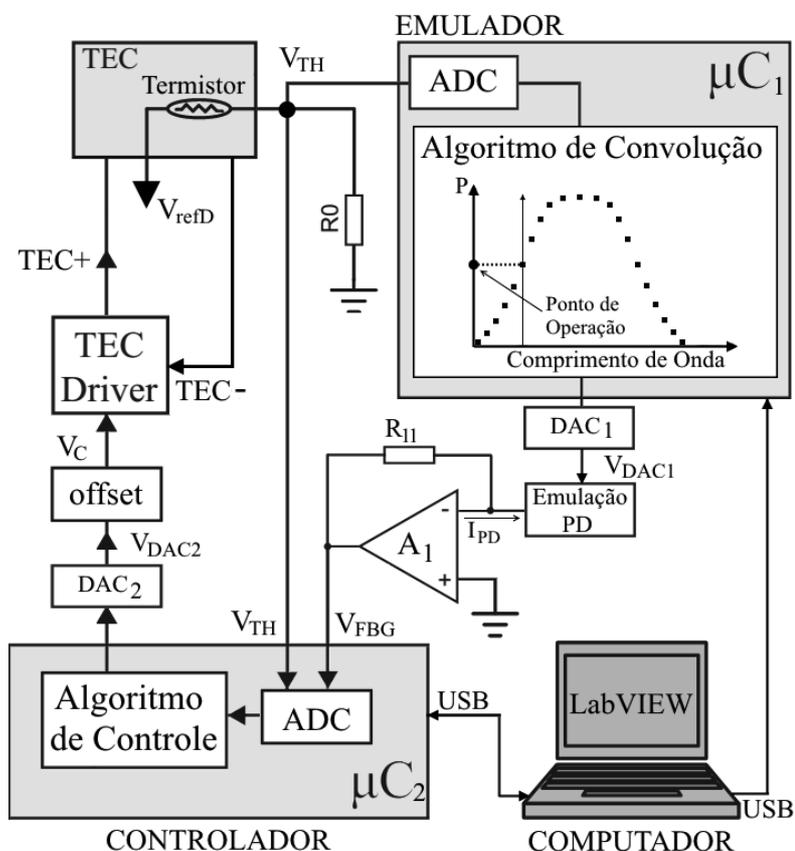


Figura 9 – Diagrama da técnica de interrogação realimentada com emulador.

Os DACs (DAC8568) utilizados no projeto são de 16 bits e possuem fundo de escala de 2,5 V, ou seja, as entradas digitais dos DACs variam de 0 a 65535, onde 65535 resulta na tensão de 2,5 V na saída.

É importante ressaltar que no decorrer do texto quando é citado o termo laser, este refere-se ao laser emulado, o mesmo vale para os outros componentes ópticos (FBG, acoplador óptico e fotodiodo), pois em nenhum momento componentes ópticos reais foram utilizados.

Sendo assim, uma abordagem detalhada do diagrama da Figura 9 será apresentado a seguir.

3.1 EMULADOR DOS COMPONENTES ÓPTICOS

O Emulador caracteriza-se na emulação do laser, acoplador óptico juntamente com a FBG e o fotodiodo.

Nos tópicos subsequentes será especificado a realização da emulação dos componentes ópticos.

3.1.1 Emulação do Laser

Consoante à teoria citada anteriormente um laser DFB real pode possuir um TEC e um termistor, sendo utilizados como elemento aquecedor/resfriador e sensor de temperatura, respectivamente. Dessa forma, pode-se emular o laser real por um termistor acoplado à face de um TEC.

3.1.1.1 Comportamento do Termistor

A maioria dos lasers DFB comerciais possuem um termistor de 10 kΩ a uma temperatura de 25 °C, porém, no presente trabalho utilizou-se um termistor de 15 kΩ. O termistor utilizado é um dispositivo de montagem superficial (SMD, em inglês *surface-mount device*) com coeficiente negativo de temperatura (NTC, em inglês *negative temperature coefficient*) cujo comportamento é não linear. A característica não linear do termistor pode ser descrita pela equação do parâmetro Beta (β) cuja equação é dada por (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2010):

$$T_0 = \frac{1}{\frac{1}{T_{25} + 273,15} + \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{R_{TH}}{R_{25}}\right)} - 273,15, \quad (3.1)$$

onde, pela folha de dados do termistor utilizado, $R_{25} = 15 \text{ k}\Omega$ e $T_{25} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ e o fator $\beta = 3528$. Com a equação (3.1) é possível determinar a temperatura do termistor (T_0) em graus Celsius em função de sua resistência (R_{TH}).

O termistor pode realizar medidas entre -40 a $105 \text{ }^\circ\text{C}$, mas, no projeto a variação de temperatura se restringe ao intervalo entre 15 a $35 \text{ }^\circ\text{C}$. No emulador e no controlador a função responsável por calcular a temperatura do laser é chamada de `calc_temp_Laser()`, sua declaração pode ser visualizada no apêndice C.

3.1.1.2 Comportamento do TEC

O TEC selecionado para o emulador suporta uma variação de $60 \text{ }^\circ\text{C}$ entre uma de uma face a outra, sua tensão máxima é de $3,75 \text{ V}$ e a corrente máxima é de 3 A . Como a corrente do TEC é relativamente alta, um circuito amplificador do tipo classe AB é utilizado, representado pelo circuito na Figura 10.

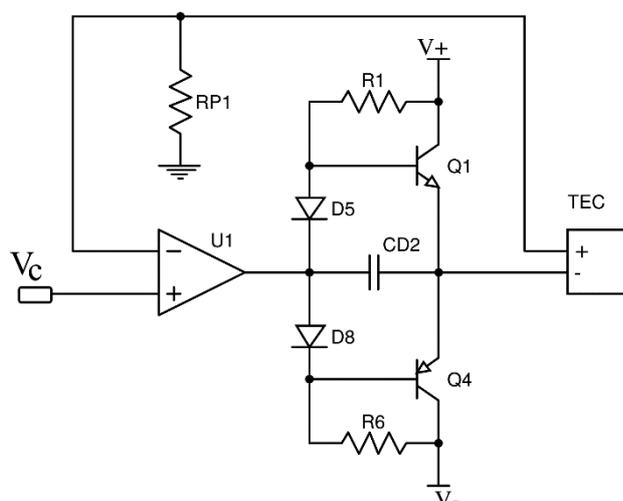


Figura 10 – Circuito de Alimentação do TEC.

No circuito da figura anterior o amplificador operacional é capaz de gerar uma corrente através do TEC proporcional a V_c e utiliza o amplificador classe AB, formado pelos transistores Q1 e Q4. Fica evidente na Figura 10 que a tensão sobre o resistor R_{P1} é aproximadamente igual a V_c e, portanto, a corrente que passará no TEC é V_c/R_{P1} , visto que é nula a corrente no terminal inversor do operacional.

Esta configuração permite fluxo bidirecional de corrente no TEC, proporcionando o aquecimento ou resfriamento em uma das faces.

O DAC₂ (Figura 9), contido no controlador, é a fonte do sinal de controle, a etapa de controle será abordada mais adiante.

3.1.1.3 Acoplamento TEC e Termistor

Para um melhor acoplamento térmico com o TEC um termistor do tipo SMD foi escolhido por apresentar uma superfície lisa que permite melhor troca de calor com o TEC e por possuir pequena massa térmica, para tal fim é necessário o uso de uma placa de circuito impresso (PCB em inglês *printed circuit board*), conforme demonstra a Figura 11.



Figura 11 – PCB do Termistor.

O TEC funciona como uma bomba de calor, transportando energia térmica de uma face para outra, sendo assim é necessário o uso de um dissipador de alumínio que mantém a temperatura em uma das faces próxima à temperatura ambiente, garantindo um melhor aquecimento ou arrefecimento da outra face (PFRIMER, 2013). O acoplamento entre o termistor, TEC e dissipador é montado conforme mostra a Figura 12.

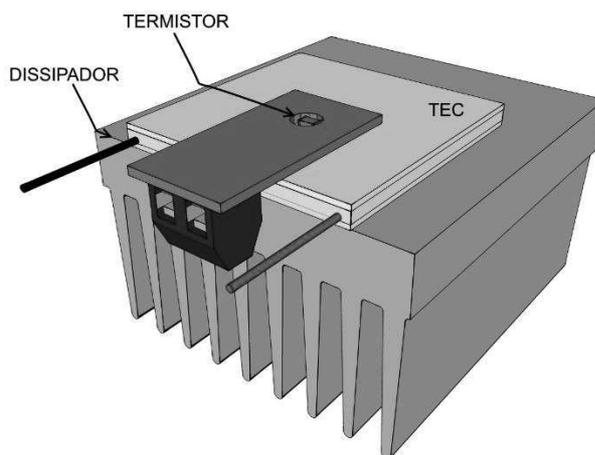


Figura 12 – Acoplamento Termistor-TEC-Dissipador.

Além do dissipador foi inserido sobre o termistor um isolante térmico, já que uma face do termistor não está em contato direto com o TEC, reduzindo assim perturbações externas.

Como citado anteriormente o laser pode ser sintonizado com uma variação de temperatura, no tópico a seguir é abordado a emulação deste comportamento.

3.1.1.4 Emulação do comportamento espectral do laser

Por ser estreito, o espectro do laser pode ser aproximado por uma função delta deslocada na posição espectral definida pelo termistor ($\delta[\lambda - \lambda_0]$).

A relação entre a posição espectral do laser e a temperatura indicada pelo termistor é definida de acordo com informações da folha de dados de um laser DFB comercial fabricado pela JDS Uniphase (modelo CQF 413.108) e é encontrada através da equação (3.2):

$$\lambda_0 = (0,092669T_0 + 1547,859392) \times 10^{-9}, \quad (3.2)$$

onde T_0 é a temperatura do laser, em grau Celsius, que neste trabalho representa a temperatura do termistor sobre o TEC, calculada pela função `calc_temp_Laser()`. No emulador a equação (3.2) é representada pela função `calc_lambda0()`.

Em sistemas de interrogação onde a fonte luminosa é um laser DFB sintonizável utiliza-se um divisor resistivo para medir a temperatura interna do dispositivo. Na presente aplicação, o mesmo método é empregado, assim como pode ser observado na Figura 9. Dessa forma, a resistência do termistor pode ser medida através da equação (3.3):

$$R_{TH} = R_0 \frac{(V_{refD} - V_{TH})}{V_{TH}}, \quad (3.3)$$

onde R_0 é a resistência colocada em série com o termistor, V_{refD} é a tensão de referência aplicada sobre divisor resistivo e fornecida pelo circuito integrado LT1790, presente na placa do controlador, e V_{TH} é a tensão sobre R_0 . Para R_0 foi utilizado uma resistência de $15 \text{ k}\Omega$ e V_{refD} tem o valor de $1,25 \text{ V}$. Assim sendo, ao aplicar o resultado da equação (3.3) na equação (3.1) obtêm-se T_0 , que representa a temperatura do laser emulado.

Através da equação (3.2) pode-se observar que em $T_0 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$, $\lambda_0 = 1549,249 \text{ nm}$ e em $T_0 = 35 \text{ }^\circ\text{C}$, $\lambda_0 = 1551,103 \text{ nm}$, este intervalo garante a interrogação da FBG entre 0 e $100 \text{ }^\circ\text{C}$.

A emulação do comportamento de uma FBG real e seu espectro de reflexão é apresentado a seguir.

3.1.2 Emulação da FBG e Espectro de Reflexão

O espectro da FBG está amostrado e armazenado no emulador. Para geração do espectro da FBG utilizou-se de um código, fornecido por Paulo de Tarso Neves Junior (Professor na Universidade Tecnológica Federal do Paraná), que foi incorporado em um aplicativo desenvolvido no LabVIEW® para melhor visualização do espectro.

O espectro da grade, simulado pelo código, possui seu comprimento de onda de Bragg centrado próximo a 1550 nm , como pode ser visto na Figura 13.

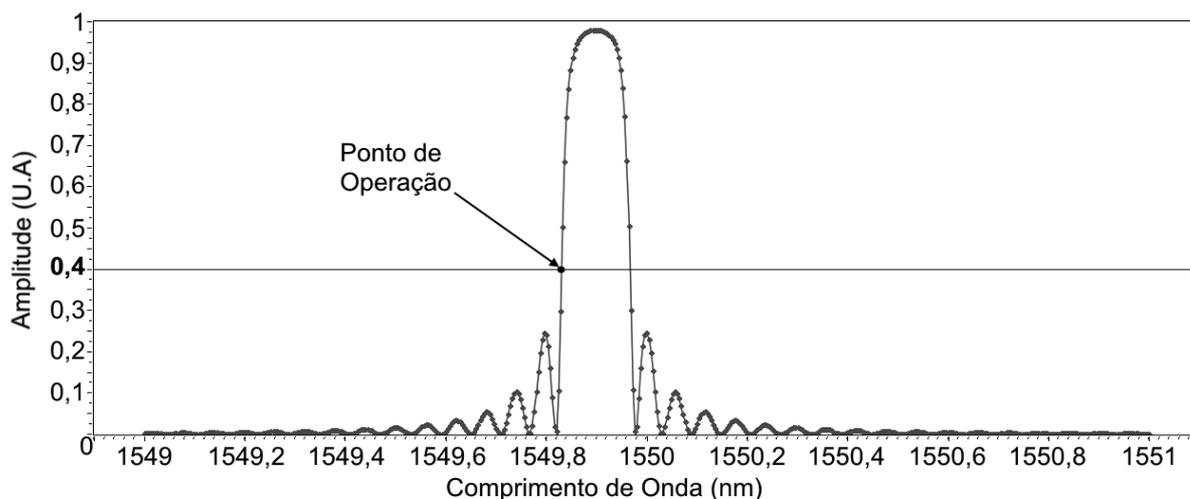


Figura 13 – Espectro de reflexão da FBG normalizado.

O espectro possui 500 pontos e a FBG amostrada se estende por 2 nm, sendo assim, a sua resolução é de $\Delta\lambda = 4 \text{ pm}$, ou seja, é possível a cada 4 pm obter a amplitude de um ponto do espectro. Pode-se observar que no ponto de máxima reflexão, a FBG reflete cerca de 98% da luz incidida.

No emulador, a grade foi normalizada na máxima abrangência de uma variável de 16 bits sem sinal, ou seja, esta representada por números inteiros de 0 a 65535. Esta normalização facilita o envio de dados para o DAC₁, pois estes podem ser enviados diretamente para o conversor sem a necessidade de realização de operações matemáticas. Tal normalização também permite que a tensão V_{FBG} varie entre 0 V e 2,5 V, como será visto mais adiante na seção 3.1.4 que trata da emulação do comportamento do fotodiodo.

O ponto de operação sobre o espectro foi escolhido como sendo 0,4 U.A (Unidade Arbitrária). A escolha deste ponto foi realizada numa região onde há uma maior inclinação do espectro.

Como neste projeto o laser é emulado, foi considerado que a potência óptica enviada à FBG possui uma magnitude suficiente para que, no ponto de máxima reflexão, a placa de controle gere uma tensão na saída do amplificador de transimpedância (V_{FBG} , de acordo com a Figura 9), próxima ao fundo de escala do ADC (2,5 V). Essa consideração garante a maior resolução possível para a amostragem da variável de controle. Em um sistema real, a potência do laser juntamente com o ganho do amplificador de transimpedância também devem ser ajustados de forma a garantir a maior excursão do sinal na entrada do ADC.

3.1.3 Emulação do Comportamento de Reflexão da FBG

Visto que o espectro da FBG está armazenado no emulador, o comportamento de reflexão da FBG é calculado pela convolução entre os espectros do laser e da FBG. Essa convolução é discutida a seguir.

3.1.3.1 Convolução

Assim como mencionado anteriormente, quando o espectro do laser se desloca sobre o espectro de reflexão da FBG (Figura 7) o fotodiodo recebe a potência óptica equivalente a um ponto sobre a curva de convolução dos dois espectros. Como o emulador se trata de um sistema digital que irá processar o comportamento do sistema físico real, é necessário a aplicação da definição digital de convolução.

A soma de convolução de dois sinais amostrados $x[n]$ com N pontos e $h[n]$ com M pontos gera um terceiro sinal $y[n]$ com $N + M - 1$ pontos, portanto $y[n] = x[n] * h[n]$ é dado por:

$$y[i] = \sum_{j=0}^{M-1} h[j]x[i-j], \quad (3.4)$$

onde i é o índice que indica qual amostra do sinal de saída será calculada e j é o índice usado para calcular a amostra de saída. A convolução de um sinal com o impulso na origem resulta exatamente no mesmo sinal, ou seja, $x[n] * \delta[n] = x[n]$, mas, se o impulso estiver deslocado, o sinal será deslocado, $x[n] * \delta[n - n_0] = x[n - n_0]$, onde n_0 representa um deslocamento (SMITH, 2003).

O espectro do laser está representado por um impulso, então a convolução do laser, em um ponto, com o espectro da FBG será o próprio ponto do espectro da FBG. Sendo assim, uma rotina para calcular esta convolução é necessária. A seguir é apresentado o processo de convolução entre os espectros, lembrando que este processo é realizado pelo emulador, então as rotinas necessárias estão no firmware da placa de emulação.

3.1.3.2 Algoritmo de Convolução

Após gravar os pontos do espectro de reflexão da FBG no emulador, este necessita de apenas dois dados para o cálculo da convolução. O primeiro é V_{TH} que indica a posição espectral do laser através das Equações (3.1), (3.2) e (3.3). O segundo dado é a temperatura em que se encontra a grade de Bragg. Esta informação é enviada da interface diretamente para o emulador e arbitrada pelo usuário através de um campo de interação. No emulador a função $fn_01()$ é a função responsável por receber a temperatura definida pela interface e calcular $\Delta\lambda_B$.

Na programação do emulador o resultado da convolução entre o espectro do laser e o da FBG é calculado pela rotina $conv()$. Como o emulador armazena apenas as amplitudes do espectro da FBG a programação dessa rotina se inicia calculando em que ponto do espectro se encontra o espectro do laser. Este cálculo é feito pela equação:

$$i = \frac{\lambda_0 - (\lambda_{B_INIT} + \Delta\lambda_B)}{\Delta\lambda} , \quad (3.5)$$

onde $\lambda_{B_INIT} = 1549$ nm (ponto onde se iniciou a amostragem do espectro simulado), λ_0 é o comprimento de onda em que se encontra o espectro do laser, $\Delta\lambda$ é constante e tem o valor de 4 pm e $\Delta\lambda_B$ é encontrado pela equação (2.6) com a sensibilidade térmica da FBG, $K_T = 6,7 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$.

O valor de calculado de i na equação (3.5) representa qual o índice do vetor de pontos do espectro da FBG (no código, esse vetor é o *array* `fbg[]`) armazena a amplitude que deve ser enviada para o conversor digital para analógico. A Figura 14 representa a organização dos pontos na memória do microcontrolador e ajuda a compreender o equacionamento.

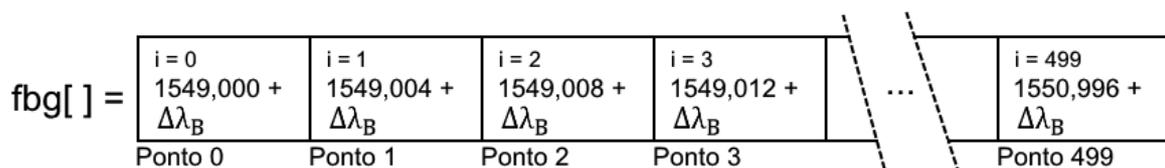


Figura 14 – Organização dos pontos do espectro da FBG no emulador.

Como exemplo, pode-se supor $\lambda_0 = 1550,012$ nm e que a temperatura da FBG seja 25°C. Neste caso temos que $\Delta\lambda_B = 0$ nm, pois a temperatura da FBG não se alterou. Substituindo tais valores na equação (3.5) obtém-se $i = 253$.

Caso a temperatura do sensor aqueça até 63,52°C (uma variação de 38,52°C) e o laser permaneça no mesmo comprimento de onda, temos que $\Delta\lambda_B = 0,4$ nm e, portanto, $i = 153$.

Fica evidente que com o aquecimento o espectro de reflexão se deslocou para um comprimento de onda maior e, portanto, o índice calculado pela equação (3.5) é menor.

Dessa forma, considerando o que foi exposto na Seção 3.1.3.1, o ponto de convolução é o próprio valor armazenado no índice i do vetor do espectro da FBG.

A sensibilidade térmica do laser e da FBG são diferentes e o espectro do laser pode estar entre dois valores de i . Sendo assim, é necessária uma interpolação para melhor estimar o ponto de convolução. O cálculo dessa interpolação é extremamente importante quando o espectro do laser se encontra nas regiões de maior inclinação do espectro da FBG, onde as amplitudes entre dois pontos adjacentes estão consideravelmente afastadas, como pode ser evidenciado na Figura 13.

Dessa forma o índice i foi definido como uma variável de ponto flutuante de precisão simples (32 bits, padrão IEEE 754) e representa um número racional, permitindo encontrar uma posição intermediária entre dois pontos vizinhos.

Para realizar uma interpolação linear é necessário utilizar a equação da reta entre dois pontos do espectro amostrado. Estes dois pontos são definidos como sendo um arredondamento de i para valores inteiros menores e maiores. Em linguagem de programação C as funções que realizam estes arredondamentos se chamam floor() e ceil() respectivamente, estas funções pertencem a biblioteca <math.h>.

Supondo dois pontos contíguos $P_n(i_n, y_n)$ e $P_{n+1}(i_{n+1}, y_{n+1})$, e o ponto de interesse $P_{conv}(i, y_{conv})$, localizado entre os dois primeiros (Figura 15) o coeficiente angular m da equação da reta é:

$$m = \tan \theta = \frac{y_{n+1} - y_n}{i_{n+1} - i_n} = y_{n+1} - y_n \cdot \quad (3.6)$$

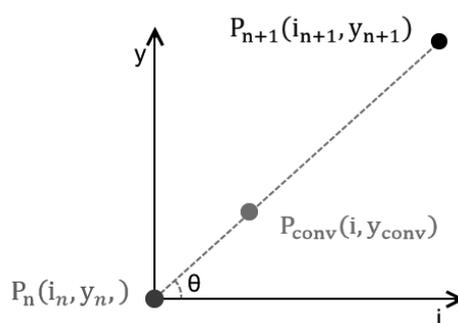


Figura 15 – Representação da interpolação para encontrar o ponto de convolução.

Após calcular o coeficiente angular é calculado o resultado da convolução, no índice i , pela seguinte equação:

$$y_{conv} = y_n + m(i - i_n) \quad (3.7)$$

Caso o índice calculado esteja fora dos 500 pontos amostrados do espectro da FBG o algoritmo retorna um valor nulo de convolução, ou seja, somente é calculada a convolução se no índice calculado houver um ponto no vetor de pontos da FBG.

Como o espectro da FBG já foi normalizado na máxima extensão de uma variável de 16 bits sem sinal, o resultado do algoritmo é enviado diretamente para o canal A do DAC₁ de 16 bits (DAC8568 da Texas Instruments).

Como a saída do DAC₁ é em tensão é necessário um circuito de condicionamento para transformar essa tensão em uma corrente que será enviada para o amplificador de transimpedância presente na placa do controlador. A saída em tensão do DAC₁ somada ao circuito de condicionamento de sinal que gera a corrente de saída formam a estrutura de emulação do Fotodiodo (Figura 9).

3.1.4 Emulação do Fotodiodo

O fotodiodo foi substituído pelo DAC₁, como mostra na Figura 9. Assim como o fotodiodo ao receber o espectro refletido, pela grade, gera uma corrente, o DAC₁ irá receber o resultado gerado pelo algoritmo de convolução e gerar uma corrente proporcional a este valor.

Em seguida ocorre o mesmo processo que na técnica sem o emulador (Seção 2.4.1). A corrente gerada passará pelo amplificador de transimpedância e o resultado é uma tensão proporcional à intensidade luminosa refletida pela grade (V_{FBG}).

O circuito que gera a corrente enviada ao amplificador de transimpedância, na placa de controle, está representado na Figura 16. Este circuito é responsável por receber um sinal do DAC₁, enviado pelo algoritmo de convolução, e gerar a corrente do fotodiodo (I_{PD}).

Uma configuração inversora com amplificador operacional foi utilizada, fazendo com que o sentido da corrente do fotodiodo seja o mesmo do fotodiodo real.

O resistor R_{A3} foi escolhido para ser igual ao resistor R_{11} de tal forma que a tensão V_{FBG} seja igual a tensão de saída do DAC₁.

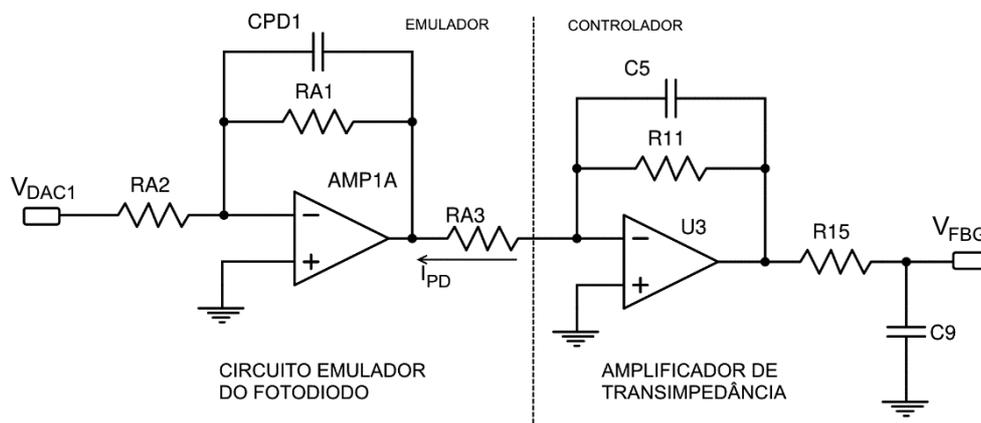


Figura 16 – Circuito emulador do fotodiodo e amplificador de transimpedância.

Após obtida a tensão V_{FBG} , a mesma é utilizada para o cálculo do erro do controlador no algoritmo de controle.

3.2 PROJETO DO CONTROLADOR DIGITAL

O diagrama da técnica de interrogação realimentada com emulador, representado na Figura 9, assim como o diagrama da Figura 6, mostram um bloco onde está inserido o controlador. A partir da Figura 8, um diagrama de blocos do sistema foi composto conforme mostra a figura abaixo:

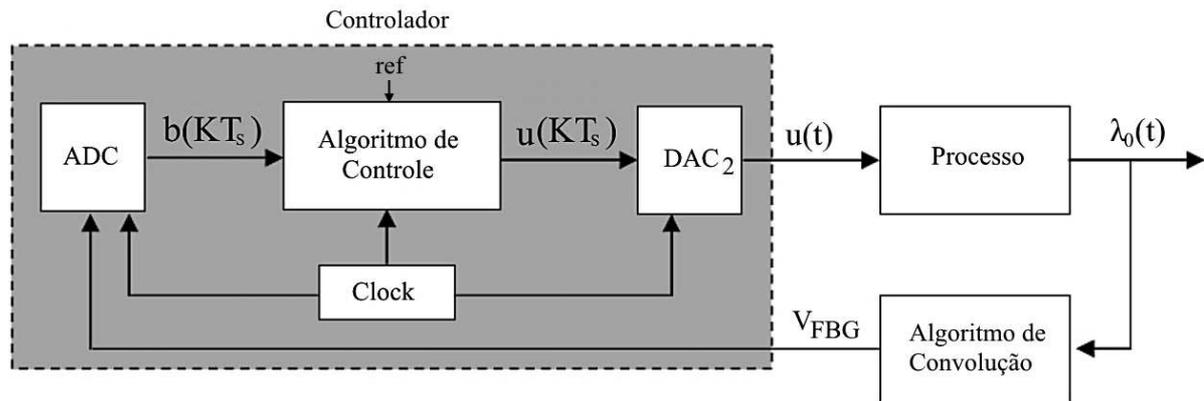


Figura 17 – Diagrama de blocos do sistema de controle.

O processo a ser controlado é, neste caso, a parte de emulação do laser sendo $u(t)$ a tensão que controla a temperatura do TEC e a saída do processo é comprimento de onda do laser. Este comprimento de onda é utilizado no algoritmo de convolução cuja saída é a tensão V_{FBG} . Esta tensão pode ir de 0 V a 2,45 V (no ponto de máxima reflexão a FBG reflete 98% da potência) e quando a mesma estiver com o mesmo valor do ponto de operação então é dito que o controle foi realizado.

O ponto de operação foi escolhido como sendo 1 V, que no espectro normalizado da FBG (Figura 13) representa 0,4 U.A. Como dito antecipadamente, a escolha deste ponto foi realizada numa região onde há uma maior inclinação do espectro.

No presente trabalho, a técnica de controle utilizada no algoritmo de controle é um PID, onde código utilizado para implementação do PID pode ser visto no apêndice C. Este código está gravado no microcontrolador do controlador e sua declaração é `pid()`.

Os ajustes dos parâmetros do controle digital foram realizados de forma empírica, visto que o modelo matemático do sistema, até então, não foi obtido. Primeiramente o ajuste foi realizado para o proporcional para que o sistema fique mais próximo de sua referência, em seguida um ajuste no derivativo foi feito de forma a fazer com que o sistema, antes lento, seja mais rápido e por fim o ajuste no integral para que o sistema siga a referência.

O Algoritmo de controle age sobre o TEC e manda um sinal de controle para o DAC, da placa do controlador. O DAC₂ converte esse sinal para analógico e fornece uma tensão que varia de 0 a 2,5 V. A Figura 18 mostra o circuito utilizado para enviar a tensão de controle (V_c) ao TEC.

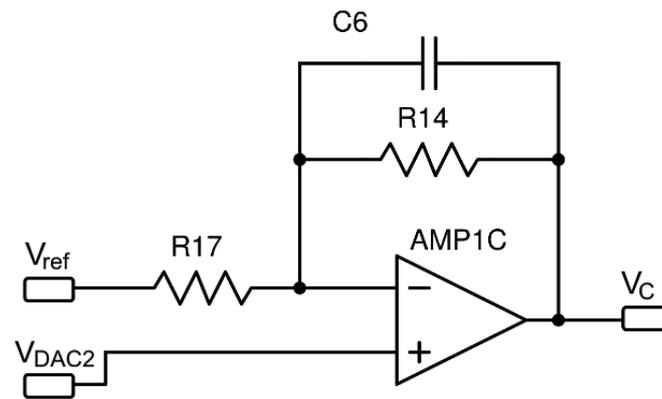


Figura 18 – Circuito de Controle.

Na Figura 18, V_{ref} tem o valor de 2,5 V (tensão de referência interna do DAC) e V_{DAC2} é a tensão de controle fornecida pelo DAC₂. A tensão de saída V_C pode ser calculada através da seguinte equação:

$$V_C = 2V_{DAC} - V_{ref} \quad (3.8)$$

Se V_{DAC} for 0 V então a saída é -2,5 V, se for 1,25 V a saída será 0 V e se for 2,5 V a saída é 2,5 V. Percebe-se que para uma variação da tensão de controle de 0 a 2,5 V a saída do circuito de controle é entre -2,5 a 2,5 V, isto ocorre pela necessidade de o controle ter de esfriar ou aquecer o TEC, pois, ao se aplicar uma tensão reversa nos terminais do TEC se o mesmo estiver aquecendo passar a esfriar e vice-versa.

V_C é a tensão de entrada para o circuito de alimentação do TEC, como pode ser vista na Figura 10. O comportamento do controlador é observado na interface, assim como as ações do sistema.

3.3 INTERFACE

De acordo com que está representado na Figura 3, o espectro da FBG desloca-se com a variação da temperatura. No entanto, para a interrogação do sensor deverá haver uma forma de controlar a temperatura e observar o comportamento do controlador, por este motivo uma interface foi desenvolvida por meio de um

computador, utilizando o software LabVIEW®. Para isto foi criado um aplicativo, no qual consta no apêndice B o painel frontal da interface e os seus diagramas.

A interface possui um campo de interação com o projetista para que se possa alterar a temperatura do sensor, fazendo com que o espectro da FBG desloque sua posição espectral. Uma vez alterada a temperatura do sensor o espectro da FBG irá se deslocar e a interface mostra essa mudança através de um gráfico. Este gráfico exibe o espectro da FBG e o espectro do laser em tempo real. Adicionalmente, na interface pode ser visto em quais comprimentos de onda se encontram os espectros da FBG e do laser, também pode ser observado um gráfico da ação de controle.

3.3.1 Protocolo de Comunicação

Para a comunicação dos dados entre a interface e os microcontroladores, ou seja, entre o computador, emulador e o controlador, um protocolo de comunicação, nos padrões RS-485, foi desenvolvido onde o computador é o mestre (*master*) e ambos, emulador e controlador, são os escravos (*slaves*). Nos microcontroladores dos *slaves* foi utilizado um transceptor RS-485 (ADM2483) onde a taxa de envio adotada foi de 500 kbps. Para o protocolo de comunicação foi utilizado um buffer de cinco bytes sendo um byte destinado para identificação do escravo (SLAVE_ID), um byte para receber a função, dois bytes para receber os dados e um para o caracter que indica o fim da transmissão (CHAR_TERM), a Figura 19 esquematiza o buffer.



Figura 19 – Buffer de comunicação.

3.4 CIRCUITOS DO EMULADOR E CONTROLADOR

O circuito eletrônico do emulador possui como componentes constituintes o TEC, termistor, microcontrolador (μC_1), um ADC e o DAC₁.

Uma resolução de 24 bits é mais adequada, sendo assim utilizou-se o ADC ADS1256 da Texas Instruments.

O microcontrolador escolhido foi o MSP430F5438A de 16 bits da Texas Instruments com uma frequência do Clock interno de 20 MHz, memória flash de 256 KB e 16 KB de ram com comunicação UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*).

O microcontrolador não possui um DAC, sendo necessária a utilização do DAC8568 de 16 bits, também da Texas. No apêndice A é apresentado o esquemático utilizado para o projeto do emulador, detalhando todos os demais elementos necessários, assim como o circuito de alimentação, ponte de retificação e regulação de tensão.

O circuito do controlador foi proposto por (PFRIMER, 2013b). No apêndice A pode ser visto o esquemático da placa do controlador.

O protótipo do sistema ficou conforme é exibido na Figura 20.

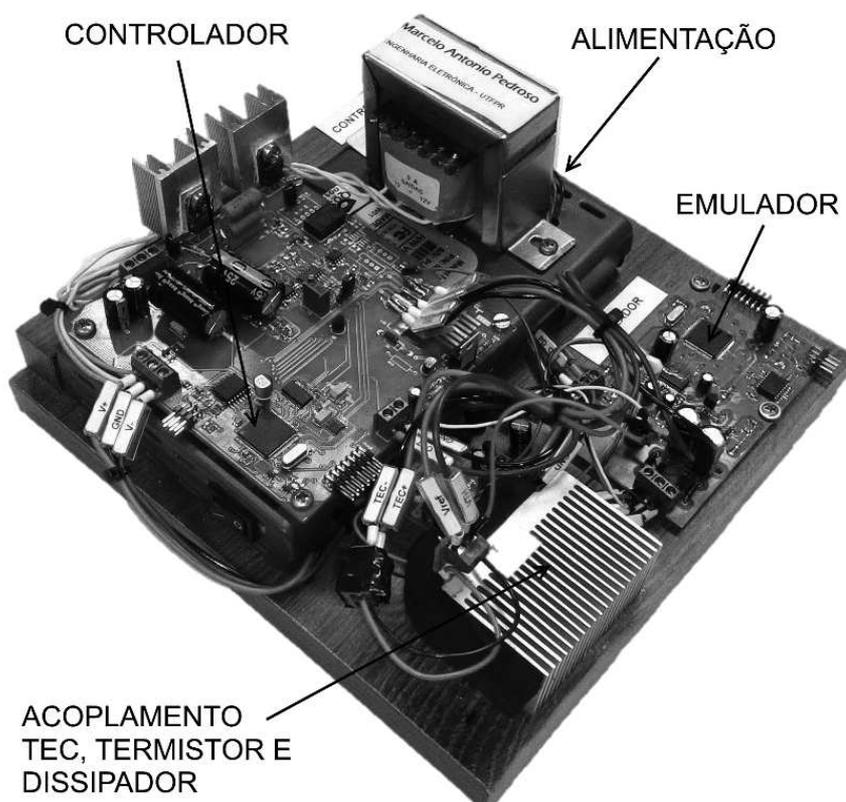


Figura 20 – Protótipo do sistema.

A seguir será detalhado o funcionamento do sistema, mostrando as ações executadas no emulador, no controlador e na interface.

3.5 FUNCIONAMENTO DO SISTEMA

O funcionamento do sistema em si pode ser melhor observado através de fluxogramas, a seguir será apresentado o funcionamento da placa de controle, do emulador e da interface.

3.5.1 Funcionamento do Controlador

Ao iniciar o sistema o espectro do laser se encontra em um comprimento de onda relacionado com temperatura inicial. Em seguida, o controlador irá esfriar o TEC até 15 °C, deslocando o espectro do laser para comprimentos de onda menores. Após o termistor ler uma temperatura de 15 °C é então iniciado o PID e este passa a atuar no sistema até chegar em torno do ponto de operação. Quando o erro for próximo de zero, a temperatura da FBG pode ser mensurada.

Caso o projetista altere a temperatura, a aplicação da interface, irá incrementa-la gradativamente de forma a simular o comportamento de uma câmara térmica controlada.

Ao alterar a temperatura da FBG o PID atua corrigindo a alteração de temperatura, pois há um erro no sistema, buscando o ponto de operação.

Para melhor detalhar o funcionamento do sistema foi realizado o fluxograma da Figura 21.



Figura 21 – Fluxograma do Controlador.

No controlador, primeiramente é executado a verificação se há uma interrupção do ADC, ou seja, um dado de entrada está pronto para ser recebido. Neste ponto o sistema funciona com uma máquina de dois estados, pois é necessário digitalizar dois dados analógicos, V_{TH} e V_{FBG} .

No estado *Ler VTH* é realizada a leitura de V_{TH} , através de um ADC. Neste estado é realizada a leitura da tensão no termistor, após obtido este valor é calculado a temperatura do laser.

No estado *Ler VFBG* é feita a leitura da tensão gerada pelo fotodiodo. Após ler V_{FBG} é verificado se o sistema deve ou não realizar o controle PID. Visto que esta tensão é uma variável de interesse no controle a mesma deve ser obtida antes de

realizar o controle, por este motivo que o algoritmo de controle possui sua chamada dentro deste estado.

Caso não ocorra uma interrupção do ADC o sistema verifica se o mestre (interface) fez algum pedido. Caso ocorra uma interrupção da UART o sistema trata esta interrupção através de um protocolo que identifica se a mensagem é de fato para este escravo. Uma vez feito o pedido, como a comunicação é half-duplex os dois escravos receberão a mesma mensagem, por este motivo foi implementado este protocolo de comunicação.

O mestre irá solicitar para o controlador apenas as leituras do ADC referentes ao V_{TH} e V_{FBG} , após realizado o pedido o mestre aguarda a resposta do escravo.

Decorrente ao código, se não houver nenhuma interrupção, tanto pelo ADC ou pela UART, o sistema irá iniciar a interrogação de fato, fazendo o TEC esfriar a uma temperatura de 15 °C, trazendo o espectro do laser para comprimentos de ondas menores. Um fato relevante a se lembrar é que a faixa de operação do termistor esta definida como entre 15 a 35 °C, por este motivo que inicialmente o laser é esfriado a 15 °C. Quando alcançada esta temperatura o algoritmo de controle é iniciado.

3.5.2 Funcionamento do Emulador

Paralelamente as ações do controlador está atuando o emulador, no qual, assim como no controlador primeiramente é verificado se há uma interrupção do ADC, caso ocorra será feita a leitura de V_{TH} para que se possa calcular a temperatura do laser através da equação (3.2). Estas etapas são necessárias para se aplicar na equação (3.5) e encontrar o índice, e então realizar o algoritmo de convolução.

Tanto o emulador quanto o controlador só terminam sua execução quando o sistema é desligado, caso contrário as instruções ficam presas em um loop.

A Figura 22 mostra, de forma mais clara, o funcionamento do emulador.

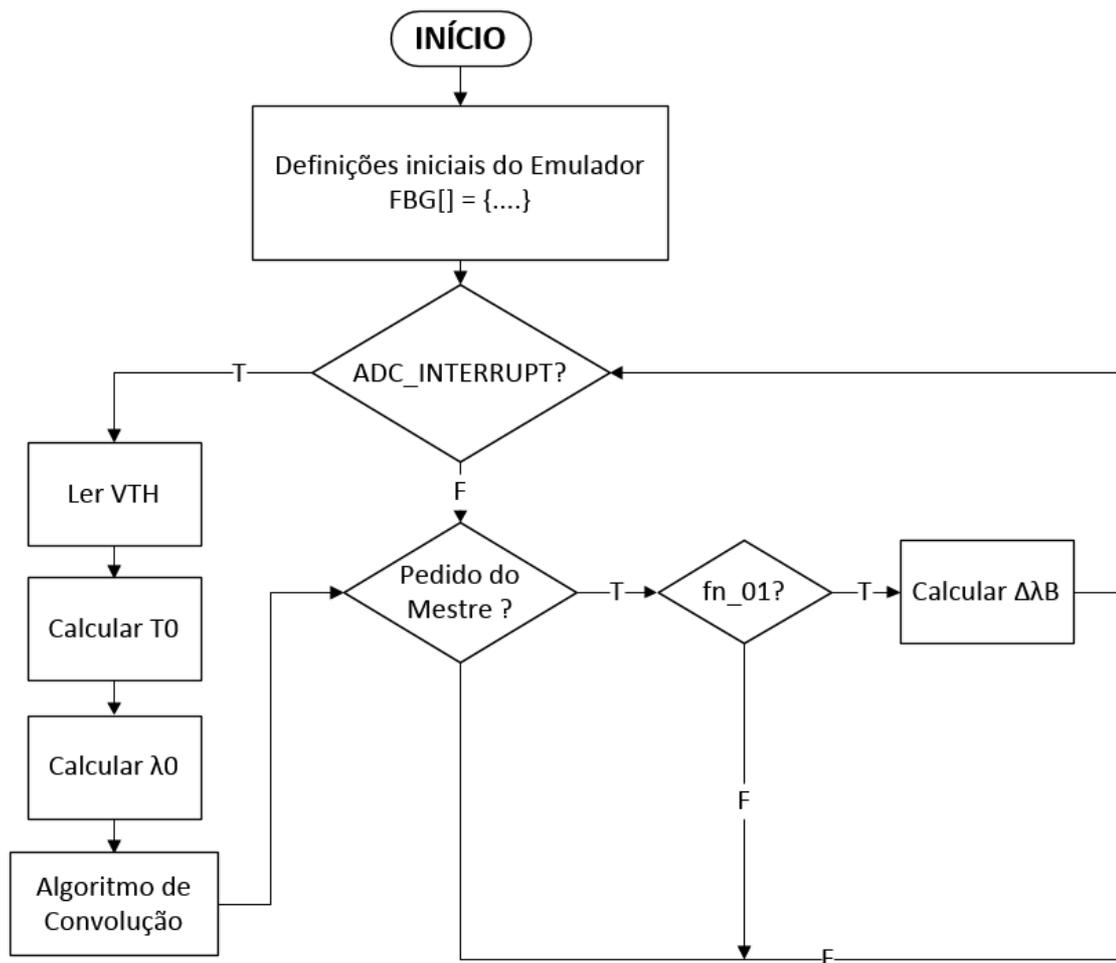


Figura 22 – Fluxograma do Emulador.

3.5.3 Funcionamento da Interface

Previamente pode-se observar que a interface (mestre) realiza o pedido de V_{TH} e V_{FBG} ao controlador e envia a temperatura da FBG ao emulador. A Figura 23 mostra o fluxograma das instruções realizadas pela interface. O fim do fluxograma ocorre quando a interface é fechada ou o botão de parada é pressionado, finalizando a comunicação com os escravos.

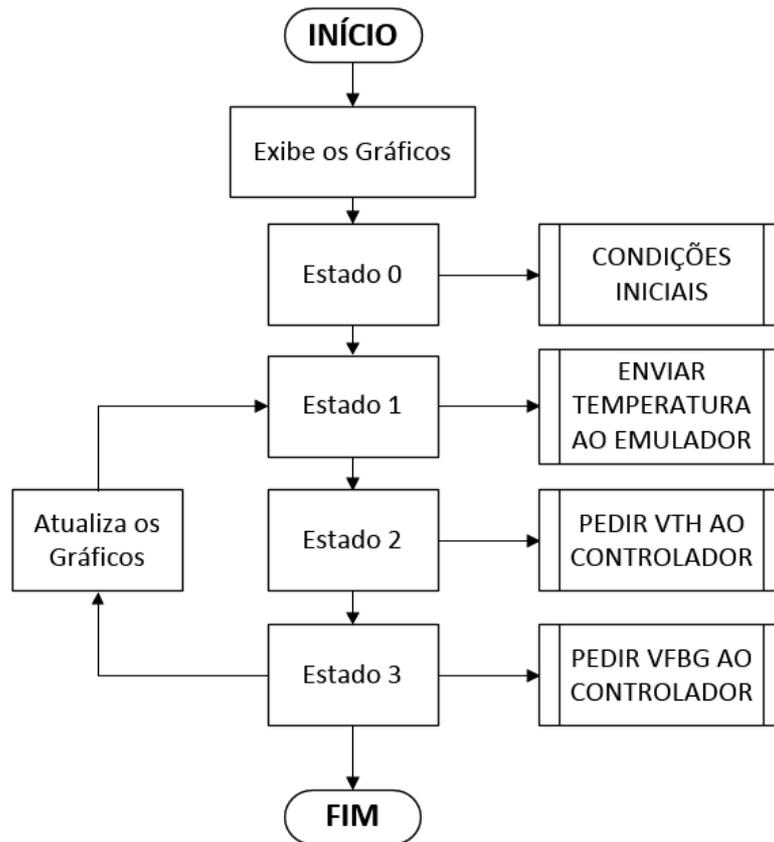


Figura 23 – Fluxograma da Interface.

É importante ressaltar que em um sistema de interrogação real, após o controle ter sido efetuado, a interrogação é feita através de um equacionamento que relaciona a temperatura do laser com a temperatura da FBG.

A equação (2.6) pode ser reescrita como:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B K_T \Delta T_B, \quad (3.9)$$

onde foi acrescentado o subscrito “B” em ΔT_B para diferenciar a variação da temperatura da FBG em relação à variação de temperatura no laser, pois estas são diferentes.

A variação da posição espectral do laser em relação a sua variação de temperatura pode ser equacionada de acordo com a seguinte expressão:

$$\Delta\lambda_0 = S_L \Delta T_0, \quad (3.10)$$

onde S_L é a sensibilidade térmica do laser.

Se o controle estiver atuando com o sinal de erro próximo de zero a variação da posição espectral do laser e da FBG serão iguais e, portanto, podemos igualar as equações (3.9) e (3.10), resultando na seguinte expressão para o cálculo da temperatura do sensor óptico (T_B):

$$T_B = T_{ref} + \frac{S_L}{\lambda_B K_T} (T_0 - T_{0ref}), \quad (3.11)$$

onde T_{ref} é uma temperatura de referência (adotou-se o valor de 25 °C no sistema proposto), T_0 é a temperatura do laser e T_{0ref} é a temperatura do laser no ponto de operação quando a FBG estiver na temperatura T_{ref} . A sensibilidade térmica do laser (S_L) pode ser calculada pela folha de dados do fabricante e tem valor de 0,092669 nm/°C.

4 RESULTADOS

Neste Capítulo serão apresentados os resultados obtidos do sistema interrogador de grade de Bragg com um emulador dos componentes ópticos. Para os resultados foi considerado uma temperatura inicial de 25 °C para a FBG emulada. Sendo assim, ao iniciar a placa de controle, o sistema se encontra em uma situação semelhante ao ilustrado na Figura 24. Nesta figura os espectros da FBG e do laser estão representados em azul e vermelho, respectivamente. A posição inicial do espectro do laser vai depender da temperatura ambiente.

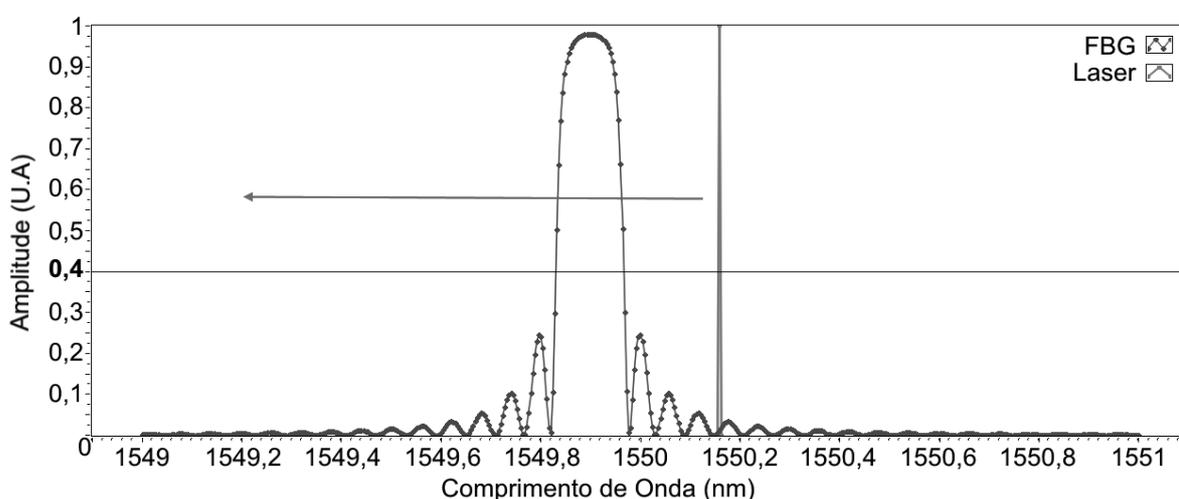


Figura 24 – Espectros do laser em 25 °C e da FBG em 25 °C.

Assim como foi mencionado na seção 3.5, o controlador inicialmente deve esfriar o TEC, deslocando o espectro do laser para comprimentos de onda menores, conforme ilustra a Figura 24. Ao atingir a temperatura de 15 °C os espectros ficaram consoante à Figura 25.

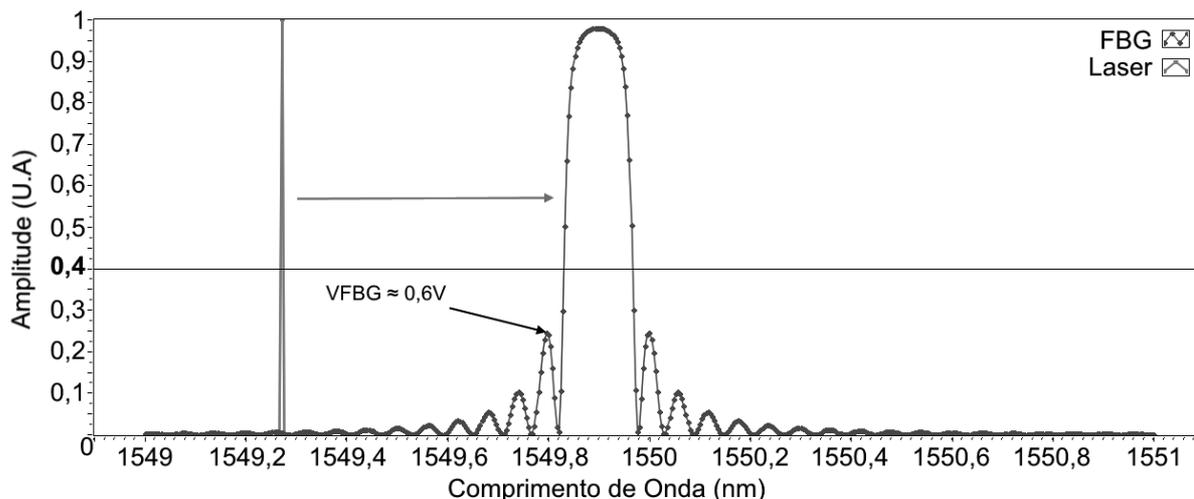


Figura 25 – Espectros do laser em 15 °C e da FBG em 25 °C.

Na Figura 25 pode-se observar que quando o laser atinge 15 °C o controlador aquece o TEC fazendo o espectro do laser mover-se para comprimentos de ondas maiores até que uma tensão $V_{FBG} = 0,6 \text{ V}$ seja reconhecida pela placa de controle, o que representa 0,24 U.A. de amplitude, assim como indicado na Figura 25. Quando isto ocorre o controle PID é ativado fazendo o espectro do laser se aproximar do ponto de operação. Como dito anteriormente o ponto de operação foi escolhido de acordo com a Figura 7 e representa uma amplitude de 0,4 U.A. ou $V_{FBG} = 1 \text{ V}$. Quando o erro do controlador está próximo de zero espectros ficaram representados de acordo com a Figura 26, onde fica evidente que o ponto de operação foi atingido.

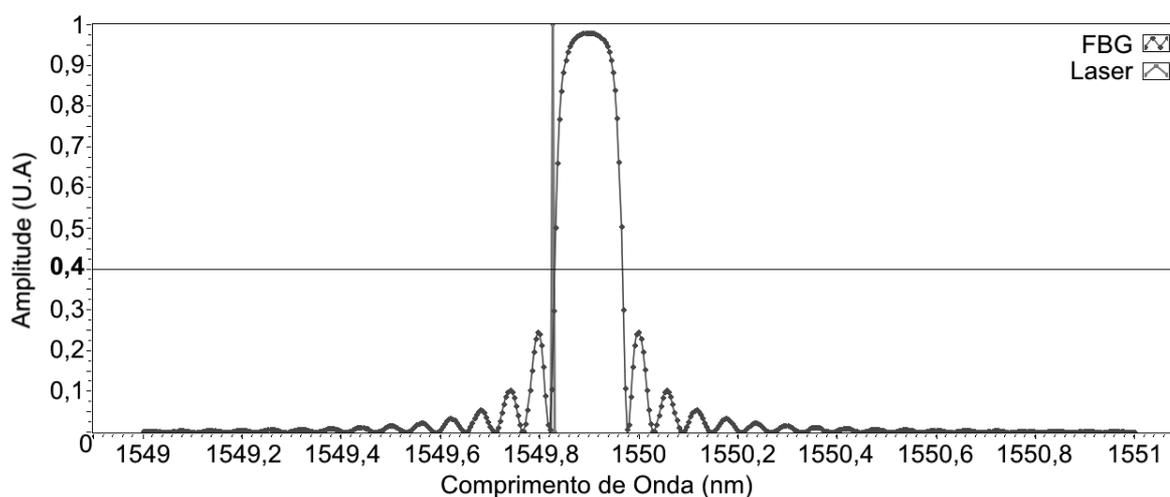


Figura 26 – Espectros do laser em 21,163 °C e da FBG em 25 °C.

Na Figura 26 observa-se que o sistema está em condições de medir a temperatura da FBG, ou seja, o controle PID está seguindo o ponto de operação com o erro do controlador próximo de zero. A visualização da medição de temperatura da FBG é realizada através da interface do Labview utilizando a Equação (3.11), onde T_{ref} foi definido como 25°C e T_{0ref} foi medido 21,16°C, aproximadamente.

A sintonia do controlador PID digital foi realizada de modo empírico, ou seja, foi necessário realizar vários testes para encontrar valores apropriados para as constantes K_p , K_i e K_d .

Após os testes, o melhor resultado encontrado pode ser visto na Figura 27, onde as constantes foram definidas com os valores: $K_p = 12000$, $K_i = 200$ e $K_d = 500$. O tempo zero na Figura 27 representa o momento em que o controle PID é ligado.

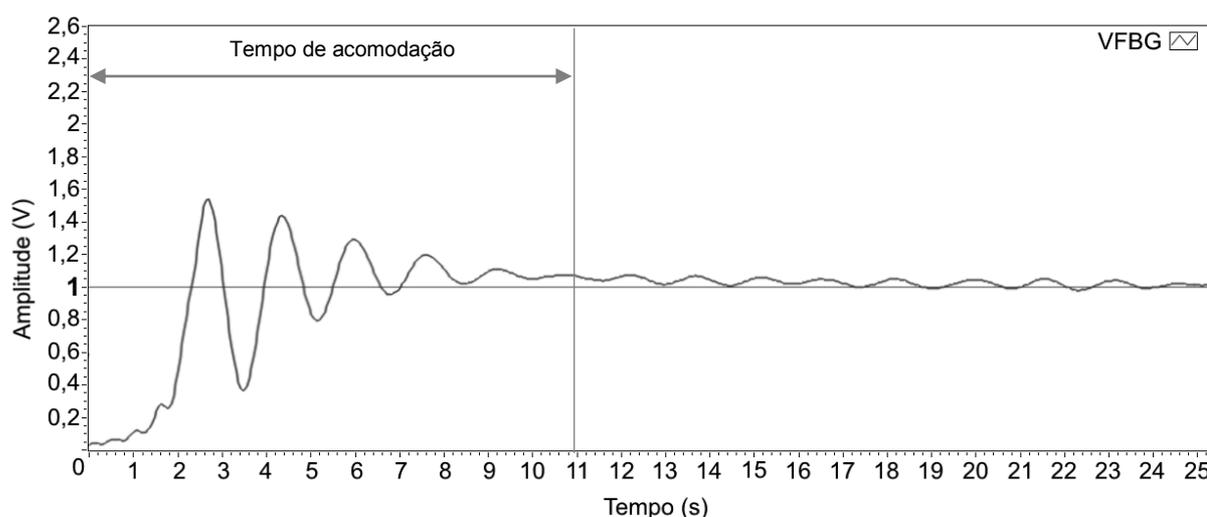


Figura 27 – Resposta do controlador PID com temperatura ambiente de 25 °C e temperatura da FBG definida em 25 °C.

Neste teste o resultado se mostrou satisfatório, o controle seguiu referência, mas, obteve um sobressinal relativamente alto e apresenta um comportamento oscilatório. O fator que contribui para este sobressinal é a elevada inclinação do espectro de reflexão no ponto de operação. Analisando o espectro da FBG pode-se perceber que uma variação pequena no comprimento de onda do laser faz com que a convolução retorne um valor alto.

Durante os testes foi constatado que o controle se comporta de forma um pouco diferente dependendo da temperatura ambiente. O resultado apresentado na

Figura 27 mostra o comportamento do sistema em um ambiente com temperatura de 25 °C. O mesmo experimento realizado em um ambiente com temperatura de 22 °C, gerou o resultado apresentado na Figura 28. Essa diferença fica evidenciada no sobressinal que é menor no primeiro experimento, entretanto o tempo de acomodação é semelhante nos dois casos (aproximadamente igual a 11 segundos).

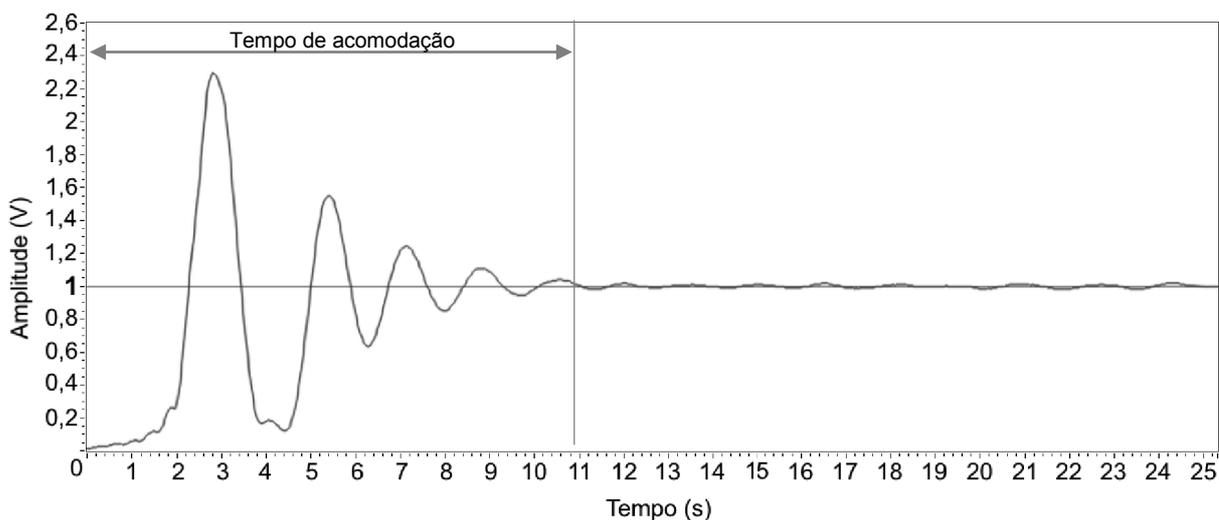


Figura 28 – Resposta do PID com temperatura ambiente de 22 °C.

De forma a observar o comportamento do controlador quando a temperatura da FBG sofre uma alteração abrupta de temperatura (variações de 1, 2, 5 e 10 °C em poucas dezenas de microssegundos) foram realizados alguns ensaios onde os resultados estão representados na Tabela 1. Em todos os testes a temperatura da FBG estava inicialmente em 25 °C e controlador PID estava atuando com erro próximo de zero e, após a aplicação da variação repentina de temperatura foi medido o tempo de acomodação da variável controlada (V_{FBG}).

Tabela 1 – Testes realizados para observar os tempos de interrogação.

Temperatura Inicial/Final da FBG (°C)	Tempo de acomodação (s)	ΔT (°C)
25/20	11,8	-5
25/23	10,9	-2
25/24	9,0	-1
25/26	8,9	1
25/27	11,5	2
25/30	12,1	5
25/35	13,8	10

Observa-se na Tabela 1 que para cada ensaio há um tempo de acomodação diferente. Visto que todas as medidas foram feitas variando a temperatura a partir de 25 °C, é esperado que para maiores variações de temperatura haverá maiores tempos de acomodação. Para medidas de temperatura quase estáticas, como em sistemas de monitoramento de grandes estruturas ou de linhas de alta tensão, o resultado apresentado na Tabela 1 mostra-se satisfatório, pois o tempo de amostragem pode ultrapassar 60 segundos e é pouco provável que uma variação de temperatura abrupta semelhante às realizadas nos testes possa acontecer.

5 CONCLUSÕES

O sistema de interrogação é capaz de simular o comportamento térmico de uma FBG e controlado através de uma interface em LabVIEW®. A atuação do controle mostrou-se completamente adequada para os objetivos propostos, dado a boa resposta obtida pelo controle digital PID.

Quanto à emulação dos componentes ópticos, o comportamento do algoritmo de convolução operou como o esperado sendo útil na programação do controle.

O uso do sistema emulador juntamente com a interface proporcionou maior agilidade na realização de testes práticos.

A temperatura do sensor pode ser alterada virtualmente pela interface e esta alteração pode ocorrer gradativamente, ou de forma abrupta caso o usuário necessite.

Testes foram realizados onde o controle digital fez o laser seguir o espectro da FBG no ponto de operação, assim como proposto. O controlador foi programado em linguagem C e os parâmetros do controle digital PID foram obtidos de forma empírica, após vários testes.

Durante os testes observou-se que o controle apresenta respostas com sobressinais diferentes dependendo da temperatura ambiente. Isto ocorre, pois uma das faces do TEC está sempre em contato direto com a temperatura ambiente e, dependendo desta temperatura, a energia que deve ser fornecida ou retirada da outra face, onde se encontra o termistor, é diferente,

O controlador apresentou um tempo de acomodação relativamente lento. No entanto, através dos resultados obtidos, constatou-se que o interrogador pode ser empregado em sistemas de monitoramento onde a temperatura é quase estática.

Além dos objetivos iniciais, durante o projeto observou-se que o emulador pode ser utilizado de modo didático, proporcionando ao docente expor aos seus discentes o comportamento de um sistema interrogador de grade de Bragg sem a necessidade da utilização dos componentes ópticos.

Outro ponto importante é de proporcionar uma interação, tanto para o projetista quanto para pesquisadores e alunos.

Diante deste raciocínio, seguem algumas sugestões para trabalhos futuros.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Neste projeto a mudança das constantes do algoritmo PID foram realizadas diretamente no código do microcontrolador do controlador. Porém, para projetos futuros é interessante o desenvolvimento de uma interação entre a interface e o controlador, que proporcione essas mudanças sem que seja necessário editar o código com os novos valores das constantes.

Outra proposta interessante de trabalho futuro é a possibilidade do sistema de interrogação descrito neste documento conseguir interrogar vários sensores FBG dispostos na mesma fibra óptica, onde o espectro de cada FBG se encontra comprimentos de onda diferentes e dentro da região de excursão do espectro do laser. Neste caso, o controlador realizaria o controle em diferentes pontos de operação para cada espectro de reflexão das FBGs.

REFERÊNCIAS

ALLIL, Regina C. Da Silva Barros. **Sensores a fibra óptica com tecnologia FBG para medida de temperatura e alta tensão**. 2010. 140f. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

DA COSTA, Eduardo Ferreira. **Nova técnica eletrônica para medida de temperatura com resolução de 0,5 m°C usando sensores de fibras ópticas com grades de Bragg**. 2009. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

DANTE, Alex. **Uma nova técnica para caracterização de grades de Bragg em fibra óptica utilizando um método de deconvolução**. 2012. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

HILL, Kenneth O; MELTZ, Gerald. **Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview**. JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 15, Nº 8, 1997.

OTHONOS, Andreas; KALLI, Kyriacos. **Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing**. Boston, Mass, EUA: Artech House, 1999.

MORIKAWA, Sérgio R. K. *et al.* **Monitoring of flexible oil lines using FBG sensors**. In 19th International Conference on Optical Fiber Sensors, volume 7004, pages 70046F–1, 4, 2008.

NEVES JR, Paulo de Tarso. **Análise temporal do espectro óptico em redes de Bragg em fibra**. 2008. Tese de Doutorado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

NISE, Norma S. **Engenharia de sistemas de controle**. Rio de Janeiro: LTC, 5ª Edição, 2009.

PEREIRA, L. F. A; SPILLER, P. A, **Controle Digital**, v1.2, PUC-RS, Departamento de Engenharia Elétrica. Disponível em:
<http://www.feng.pucrs.br/~gacs/new/disciplinas/scd/apostilas/digital_V1_2.pdf>. Acesso em: 01 mar. 2015.

PFRIMER, Felipe W. D. **Temperature measurement technique in fiber Bragg gratings networks using optical feedback**. 2013. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013a.

PFRIMER, Felipe W. D. et. al. **Closed-loop Interrogation Techniques for Temperature Measurement Using Fiber Bragg Gratings**. PHOTOPTICS, 2013b.

SMITH, Steven W. **Digital Signal Processing: A Practical Guide for Engineers and Scientists**. Burlington, MA: Elsevier, 4th Edition. 2003.

BALBINOT, Alexandre; BRUSAMARELLO, Valner João. **Instrumentação e fundamentos de medidas**. Rio de Janeiro: LTC, 2ª Edição, 2010.

DA SILVA JR, João Manoel Gomes; BAZANELLA, Alexandre Sanfelice, **Ajustes de Controladores PID**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Departamento de Engenharia Elétrica, 2000. Disponível em:
<<http://www.ece.ufrgs.br/~jmgomes/pid/Apostila/apostila/>>.
Acesso em: 15 abr. 2015.

Texas Instruments (2003). ADS1256 Very Low Noise, 24-Bit, Analog-to-Digital Converter, Technical report, Texas Instruments Inc. Texas Instruments (2003). ADS1256 Very Low Noise, 24-Bit, Analog-to-Digital Converter, Technical report, Texas Instruments Inc. Disponível em:
<<http://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/ads1256.pdf>>
Acesso em: 21/05/2015.

Texas Instruments (2009). DAC8568 Digital-to-Analog Converter Datasheet, Technical report, Texas Instruments Inc.
Disponível em:
<<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/dac8568.pdf>>
Acesso em: 21/05/2015.

Texas Instruments (2010). MSP430F5438A Mixed Signal Microcontroller datasheet, Technical report, Texas Instruments Inc.
Disponível em:
<<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430f5438a.pdf>>
Acesso em: 21/05/2015.

Vishay(2008). NTC Thermistors, Folha de Dados disponível em:
<<http://www.farnell.com/datasheets/438946.pdf>>.
Acesso em: 21 abr. 2015.

APÊNDICE A – ESQUEMÁTICOS DOS CIRCUITOS ELETRÔNICOS

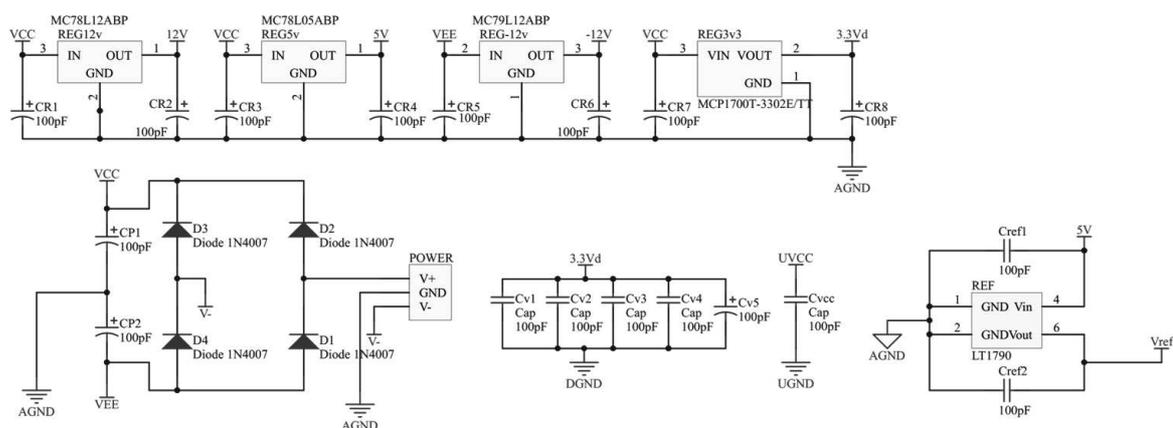


Figura A.30 – Esquemático do Emulador – Parte 2.

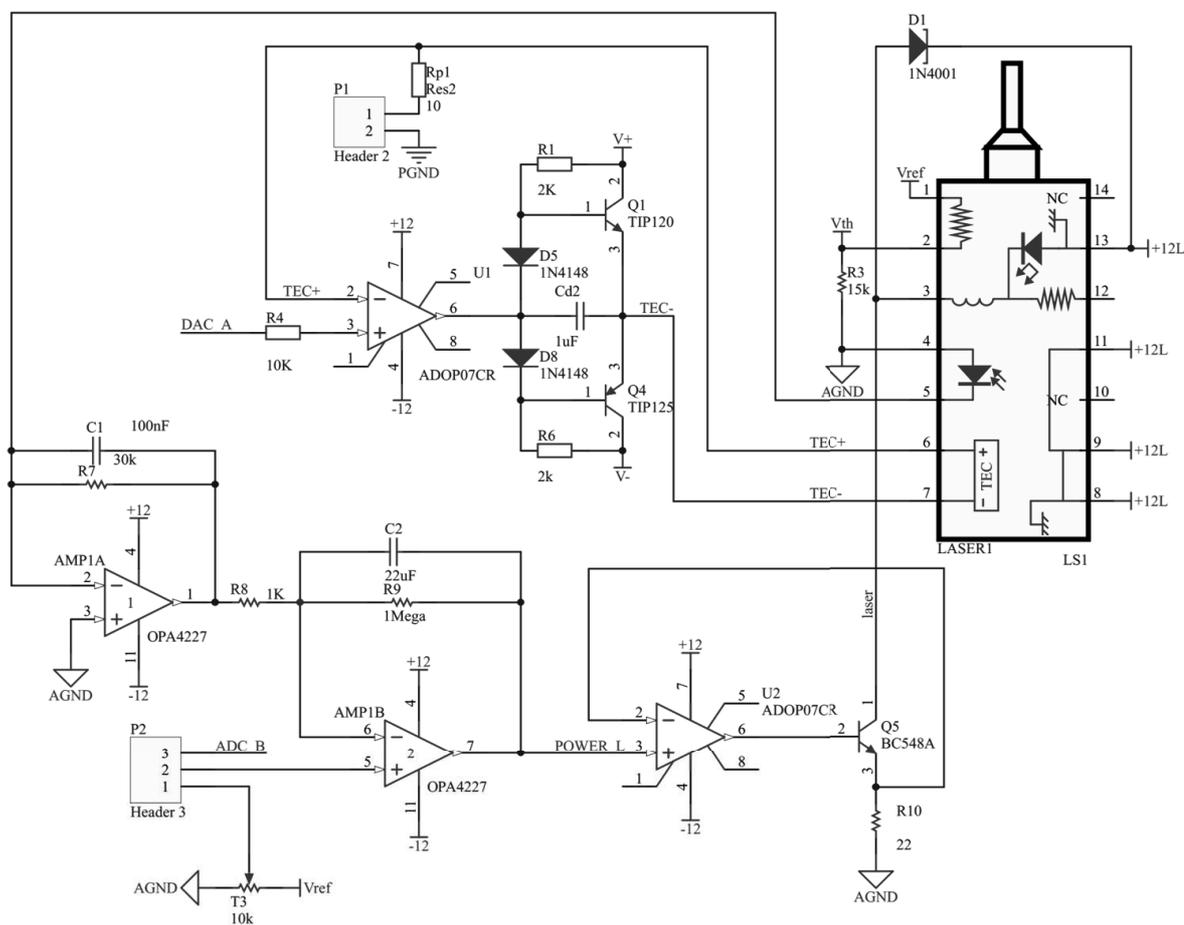


Figura A.31 – Esquemático do Controlador – Parte 1.

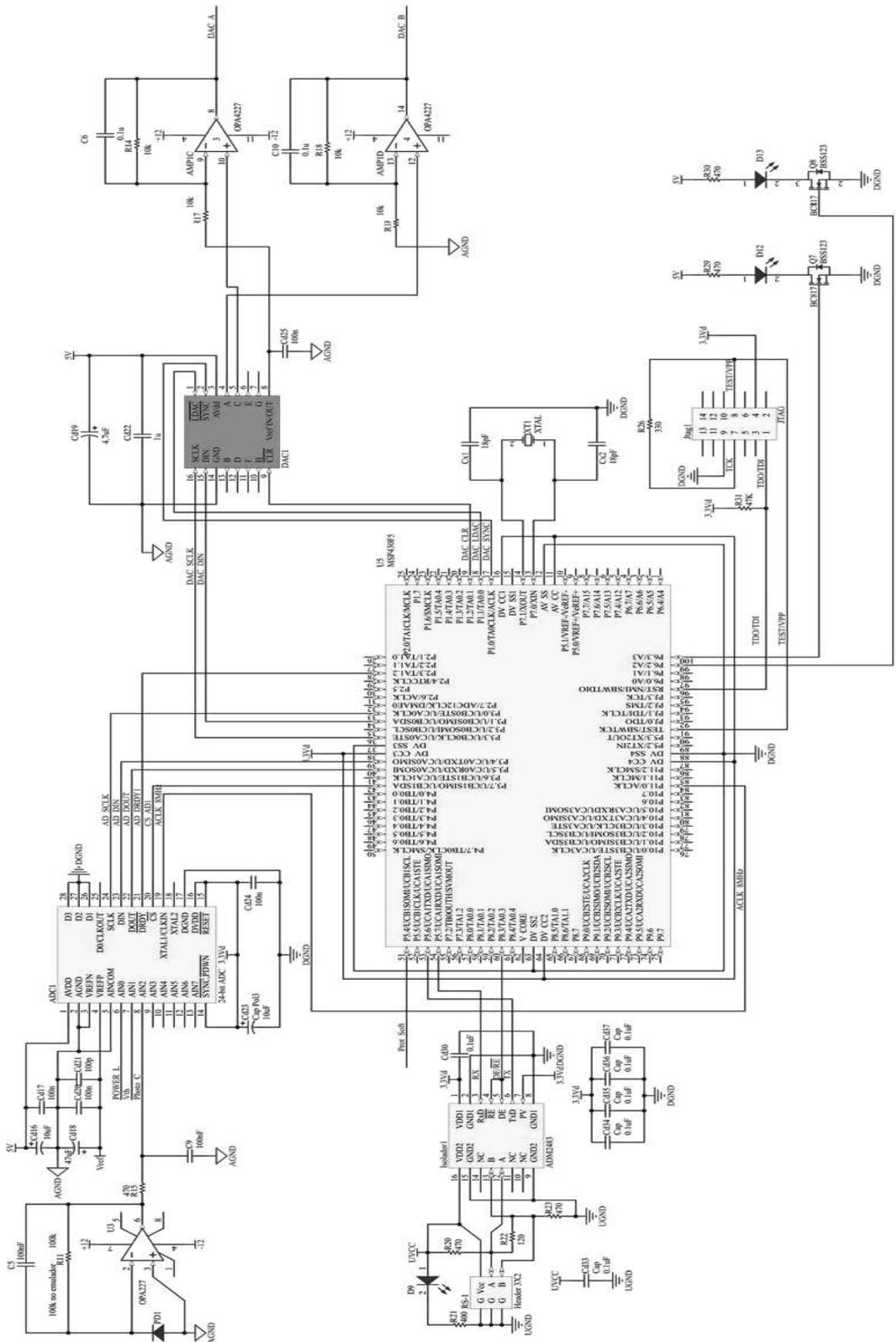


Figura A.32 – Esquemático do Controlador – Parte 2.

APÊNDICE B – INTERFACE E DIAGRAMAS DE BLOCOS

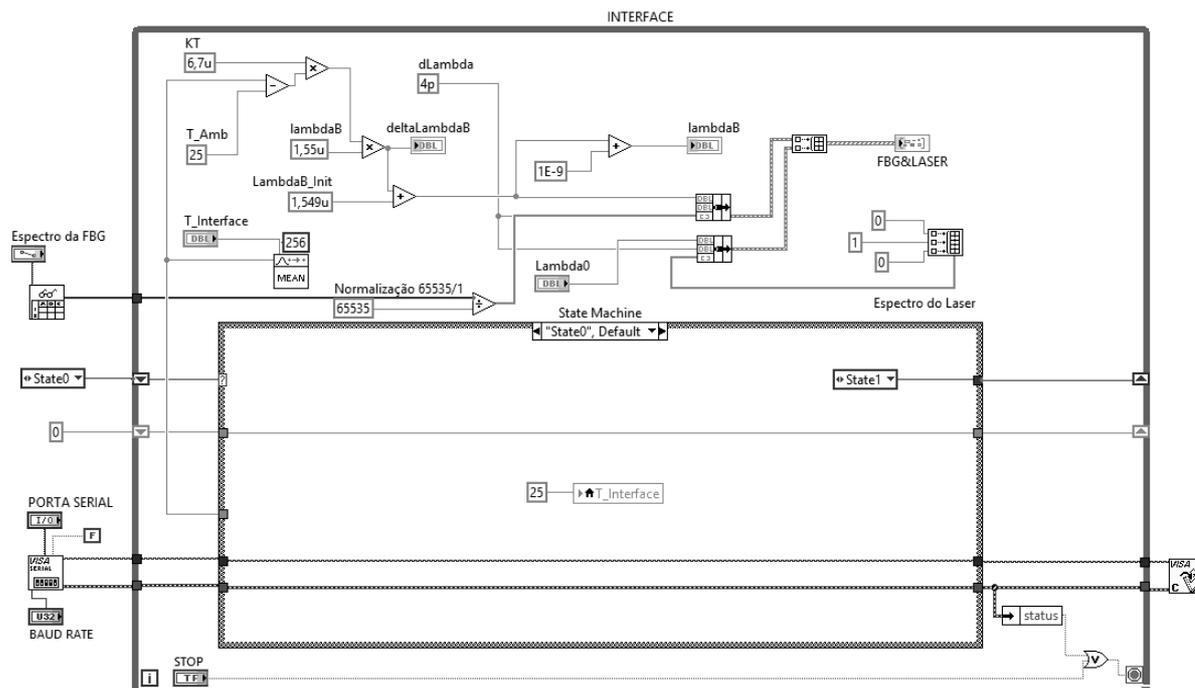


Figura B.34 – Diagrama da Interface no Estado Inicial.

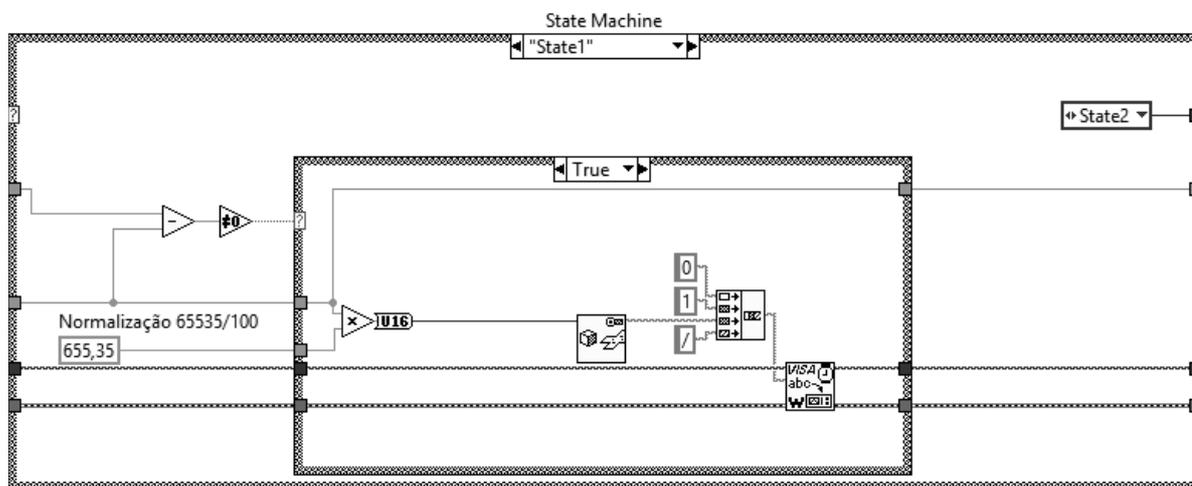


Figura B.35 – Diagrama da Interface no Estado 1.

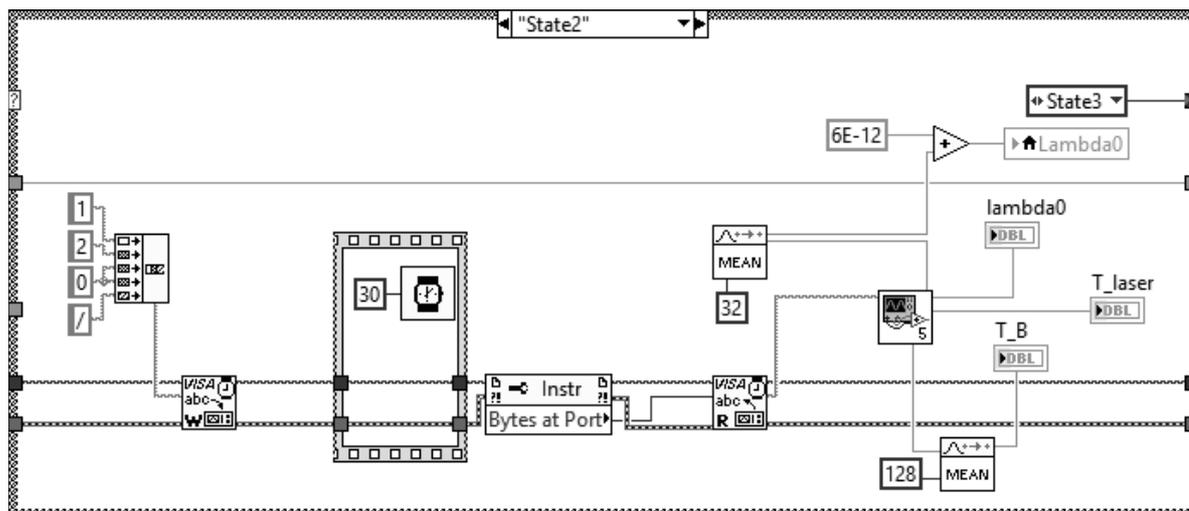


Figura B.36 – Diagrama da Interface no Estado 2.

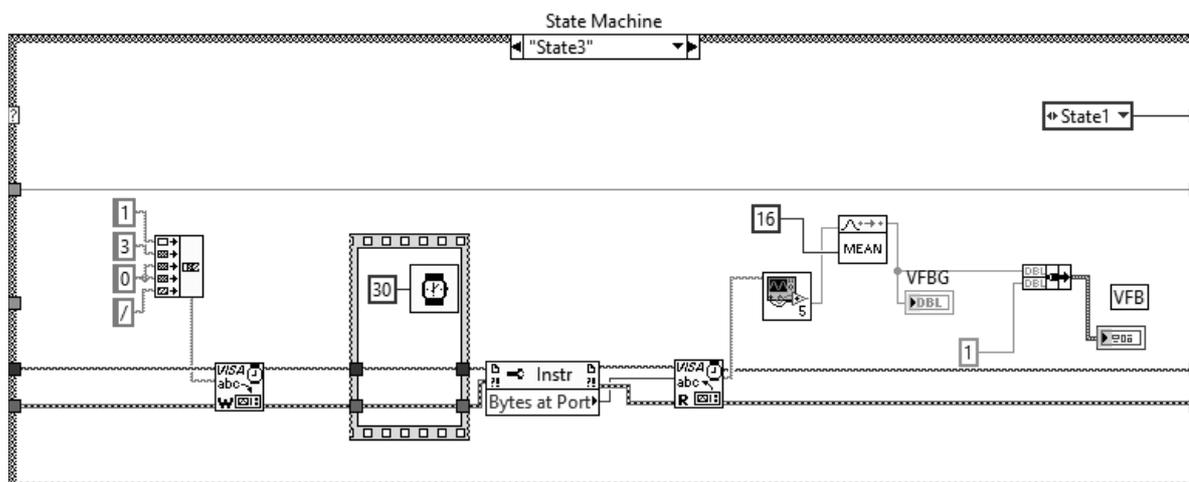


Figura B.37 – Diagrama da Interface no Estado 3.

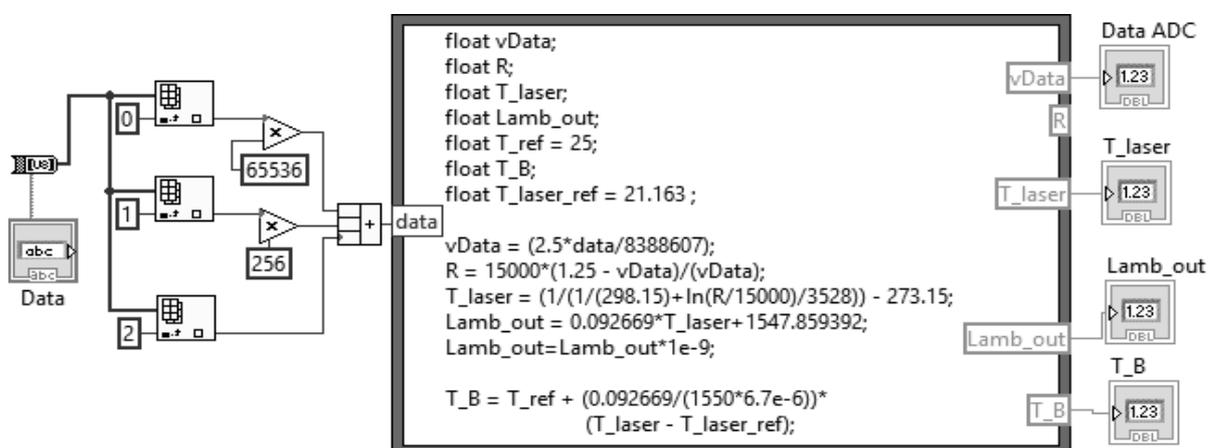


Figura B.38 – Diagrama Auxiliar para cálculos.

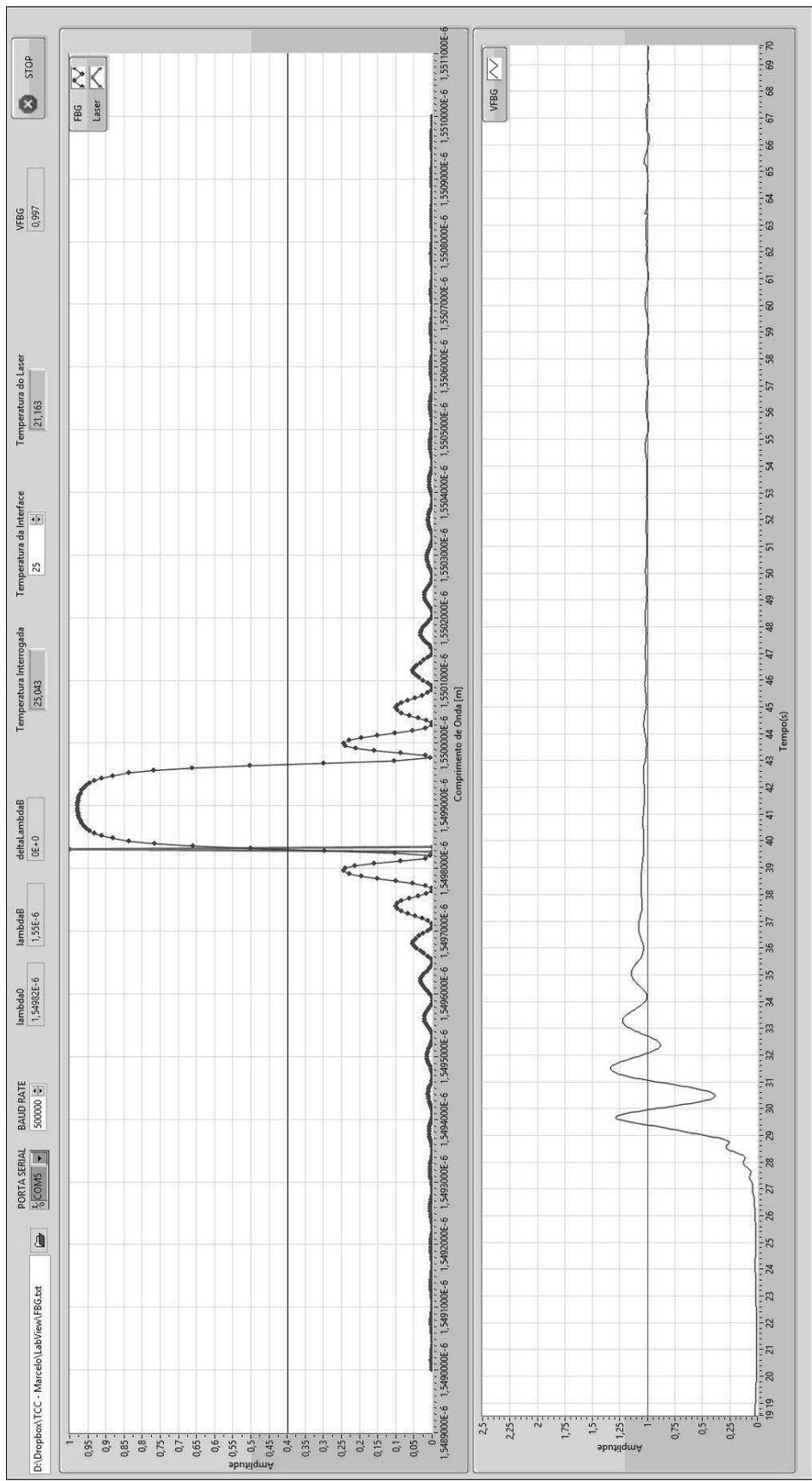


Figura B.39 – Painel Frontal da Interface.

APÊNDICE C – CÓDIGOS FONTE UTILIZADOS

B.1 – CÓDIGO DO CONTROLADOR

```

//=====
//
//                                BIBLIOTECAS
//=====
#include "msp430x54xA.h"           // MSP430F5438A
#include "hal_pmm.h"              // SetVCore
#include "hal_pmm.c"              // Regulador de Tensão do uC
#include "clock.h"                // Cristal
#include "leds.h"                 // Leds da Placa
#include "iso_rs_485.h"           // Isolador RS485
#include "ads1256.h"              // ADC 24 bits
#include "dac8568.h"              // DAC 16 bits
#include <math.h>                 // uso das funções floor, ceil e log
//=====
//
//                                DEFINIÇÕES DO uC
//=====
#define true                      0xff           // booleana 1
#define false                     0x00          // booleana 0
#define F_CLK                     20000000      // Frequência de clock do uC
#define BAUD_RATE                 500000        // Baud rate da UCA1
#define DAC8568_BAUD              20000000      // Baud rate da UCB0 (dac)
#define PRESCALER_UART            F_CLK/BAUD_RATE // Prescaler da UART
#define ADS1256_BAUD              2500000       // Baud rate da UCA0 (adc)
#define PRESCALER_ADC             F_CLK/ADS1256_BAUD // Prescaler do SPI (ads1256)
#define PRESCALER_DAC             F_CLK/DAC8568_BAUD // Prescaler do SPI (dac8568)
#define vRef                      1.25         // Vref sobre Termistor (LT1790)
#define vRef_Adc                  1.25         // Tensão de ref do ADC
//=====
//
//                                DEFINIÇÕES DO SISTEMA
//=====
#define T_25                      25           // Temperatura Inicial do Sistema 25 °C
#define R_25                      15000        // Termistor de 15K ohms em temperatura T_25
#define R_0                       15000        // Resistência do Divisor resistivo
#define BETA                      3528         // Beta do Termistor
#define DELTALAMBDA               0.004        // Variação do Comprimento de Onda 0.004 nm
#define SLAVE_ID                   '1'         // Identificação do controlador
#define T_MIN_L                   15           // Temperatura Mínima do Laser
#define V_INIT_PID                 0.6         // Tensão VFBG para iniciar o Controle
//=====
//
//                                DEFINIÇÕES DO CONTROLE
//=====
#define KP                        12000        // Ganho do Proporcional
#define KI                        200          // Ganho do Integrador
#define KD                        500          // Ganho do Derivativo
#define LIMITE_S                  32767        // Saturação do Controle
#define LIMITE_I                  -32768
//=====
//
//                                VARIÁVEIS DA COMUNICAÇÃO
//=====
unsigned char frame_rd[5];        // Frame de leitura
unsigned int pos_frame;           // Variável de controle do frame_rd
unsigned char slaveID;           // Identificação do Escravo
unsigned char fn;                 // Função
unsigned int dado;                // Dados
unsigned char char_term = '/';   // Caracter de terminação
//=====
//
//                                FLAGS
//=====
unsigned int flag_rd = false;     // Flag que indica que comunicação está
pronta!
unsigned int flag_pid = false;    // Flag para ligar/desligar o PID
unsigned int flag_t_min = false;
//=====
//
//                                VARIÁVEIS DO SISTEMA
//=====
float Vth;                        // Vth = Tensão no Termistor
float Vfbg;                        // Tensão de saída do amp de transimpedância
unsigned long int adc1_dado_vth;   // Leitura da tensão Vth
unsigned long int adc1_dado_vfbg;  // Leitura da tensão Vfbg
float lambda0;                    // Comprimento de Onda do Laser
float temp0;                       // Temperatura do Laser
float dac_out = 0x7fff;           // Saída do DAC para emulação do Fotodiodo

```

```

enum {lendo_vth, lendo_vfbg} adc_state;          // Indica qual variável o ADC está lendo
//=====
//
//                               VARIÁVEIS DO CONTROLE
//=====
float      erro;                          // Erro do sistema
float      erro_anterior;                  // Erro anterior do sistema
float      setpoint = 1;                   // Tensão de referência para o controle
long int   controle;                       // Sinal de Controle PID
float      proporcional;                   // Ação Proporcional
float      integral;                       // Ação integral
float      derivativo;                     // Ação derivativa
//=====
//
//                               DECLARAÇÃO DE FUNÇÕES
//=====
void fn_02(void);                          // Envia a Tensão VTH para a Interface
void fn_03(void);                          // Envia a Tensão VFBG para a Interface
void envia_dado_24b(unsigned long int dado24); // Envia um dado de 24 bits
float calc_vfbg(void);                     // Calcula a tensão VFBG
void pid(void);                             // Algoritmo de Controle
float calc_temp_Laser(void);               // Calcula a Temperatura do Laser
//=====
//
//                               INÍCIO DO PROGRAMA
//=====
void main(void)
{
    unsigned int i = 0;
    WDCTL = WDTPW + WDTOLD;                // Stop WDT
    iniciar_leds();                         // Inicia os leds
    SetVCore(PMCCOREV_3);                   // Set VCore to 1.8MHz for 20MHz
    iniciar_cristal();                      // Inicia o MCLK
    dac_com_init(PRESCALER_DAC);           // Inicia a porta do DAC
    dac_channels_on();                      // Liga os canais A, C, E e G do DAC
    dac_ref_on();                           // Liga a referência interna de 2,5V
    dac_canal_C(0x7fff);                   // Zera a saída do dac ligado ao TEC
    adc_com_init(PRESCALER_ADC);           // Inicia a comunicação com o adc
    uart_init(PRESCALER_UART);            // Inicia a UCA1
    while(P2IN&BIT3);                      // Espera DRDY para resetar o ADC
    // Inicialização do ADC

    adcl_reset();
    pisca_LED(1);
    adcl_easy_setup(ACAL | BUFEN, P_AIN1 | N_AINCOM, CLK_0, R50SPS);
    pisca_LED(1);
    adcl_selfcal();                         // Auto Calibração do ADC
    pisca_LED(1);
    P5DIR |= BIT4;
    P5OUT &= ~BIT4;                         // Desliga proteção por Hardware
    adc_state = lendo_vth; // Inicia Lendo VTH
    _BIS_SR (GIE);

    while(1){
        if(!(P2IN&BIT3)){                  // Espera conversão
            switch(adc_state){             // Verifica qual canal será lido

                case lendo_vth:           // Estado de Leitura de VTH
                    adcl_wreg(MUX, P_AIN2 | N_AINCOM);
                    sync_adcl();
                    wakeup_adcl();
                    adcl_dado_vth = adcl_read_data(); // Leitura do VTH
                    temp0 = calc_temp_Laser();        // Calcula a Temperatura do Laser
                    adc_state = lendo_vfbg;          // Vai para o próximo estado
                    break;

                case lendo_vfbg:         // Estado da Leitura de VFBG
                    adcl_wreg(MUX, P_AIN1 | N_AINCOM);
                    sync_adcl();
                    wakeup_adcl();
                    adcl_dado_vfbg = adcl_read_data(); // Leitura Vfbg
                    Vfbg = calc_vfbg();
                    adc_state = lendo_vth;           // Vai para o próximo estado
                    if(flag_pid){
                        pid();                       // Inicia Controle PID
                    }
                    break;
            }
        }
    }
}

```

```

if(flag_rd){
    if(frame_rd[0] == SLAVE_ID){
        fn = frame_rd[1];
        dado = (unsigned int)frame_rd[2]*256 +
            (unsigned int)frame_rd[3];
        switch(fn){
            case '2':
                fn_02();
                break;
            case '3':
                fn_03();
                break;
            default: break;
        }
    }
    flag_rd = false;
}

if(temp0>T_MIN_L && !flag_pid && !flag_t_min){ // Temperatura do Laser > 15°C
    dac_canal_C(0x0000); // Sim, então esfria o Laser
}
else
    flag_t_min = true; // Não, então atingiu 15 °C
if(flag_t_min && !flag_pid){ // Se Controle ainda nao foi Ligado
    dac_canal_C(0xffff); // Varre o espectro, esquenta o Laser
    if(Vfbg >= V_INIT_PID) // Tensão VFBG >= 0.6?
        flag_pid = true; // sim, Liga o controle PID
}
}

//=====
//                                INTERRUPTÃO DO ADC1
//=====
#pragma vector = PORT2_VECTOR
__interrupt void Port_2(void){
    if(P2IFG&BIT3){ // Interrupção do adc1
        P2IFG |= BIT3; // P2.3 IFG cleared
    }
}

//=====
//                                INTERRUPTÃO DA UART
//=====
#pragma vector=USCI_A1_VECTOR
__interrupt void USCI_A1_ISR(void){
    switch(__even_in_range(UCA1IV,4)){
        case 0:break; // Vector 0 - NO INTERRUPT
        case 2: // Vector 2 - RXIFG
            // Tratamento da Comunicação
            // Recebe o Buffer RX
            frame_rd[pos_frame] = UCA1RXBUF;
            pos_frame++;
            // Incrementa posição do frame
            if(frame_rd[pos_frame - 1] == '/'){ // Caracter de Terminação ?
                pos_frame = 0; // Sim, reseta a posição do frame
                flag_rd = true; // Comunicação pronta!
            }
            break;
        case 4:break; // Vector 4 - TXIFG
        default:break;
    }
}

//=====
//                                FN_02 - Envia a Tensão VTH para a Interface
//=====
void fn_02(void){
    envia_dado_24b(adc1_dado_vth);
}

//=====
//                                FN_03 - Envia a Tensão VFBG para a Interface
//=====
void fn_03(void){
    envia_dado_24b(adc1_dado_vfbg);
}

//=====
//                                Envia um dado de 24 bits
//=====
void envia_dado_24b(unsigned long int dado24){
    uart_wr(dado24 >> 16);
    uart_wr(dado24 >> 8);
}

```

```

    uart_wr(dado24);
}
//=====
//                               Calcula a tensão VFBG
//=====
float calc_vfbg(void){
    Vfbg = (float)adcl_dado_vfbg*2*vRef_Adc/8388607;
    return Vfbg;
}
//=====
//                               Algoritmo de Controle
//=====
void pid(void){
    erro_anterior = erro;
    erro = (setpoint - Vfbg);
    // Calcula o erro

    proporcional = KP*erro;
    integral = KI*(erro + erro_anterior)/2 + integral;
    // Calcula P
    // Calcula I

    if(integral >= LIMITE_S){integral = LIMITE_S;}
    if(integral <= LIMITE_I){integral = LIMITE_I;}
    // Saturação do Integral

    derivativo = derivativo - KD*(erro - erro_anterior);
    // Calcula D

    controle = (long int)(proporcional + integral + derivativo);
    // P + I + D

    if(controle >= LIMITE_S){controle = LIMITE_S;}
    if(controle <= LIMITE_I){controle = LIMITE_I;}
    // Saturação para o controle
    controle = controle + 0x7fff;
    // Offset para o DAC

    dac_canal_C((unsigned int)controle);
    // Envia para o canal C do DAC
}
//=====
//                               Calcula a Temperatura do Laser
//=====
float calc_temp_Laser(void){

    float t_Laser;
    float Rth;

    Vth = ((float)adcl_dado_vth * 2 * vRef_Adc)/(8388607);
    Rth = R_0*(vRef - Vth)/(Vth);
    t_Laser = (1/(1/(T_25+273.15)+log(Rth/R_25)/BETA)) - 273.15;
    // Tensão do Termistor
    // Resistência do Termistor
    // Temperatura do Laser

    return t_Laser;
}
//=====

```

B.2 – CÓDIGO DO EMULADOR

```

//=====
//                               BIBLIOTECAS
//=====
#include "msp430x54xA.h"
#include "hal_pmm.h"
#include "hal_pmm.c"
#include "clock.h"
#include "leds.h"
#include "iso_rs_485.h"
#include "adsl256.h"
#include "dac8568.h"
#include <math.h>
//=====
//                               DEFINIÇÕES DO uC
//=====
#define true 0xff // booleana 1
#define false 0x00 // booleana 0
#define F_CLK 2000000 // Frequência de clock do uC
#define BAUD_RATE 500000 // Baud rate da UCA1
#define DAC8568_BAUD 2000000 // Baud rate da UCB0 (dac)
#define VELOCIDADE F_CLK/BAUD_RATE // Prescaler da UART

```

```

#define ADS1256_BAUD 2500000 // Baud rate da UCA0 (adc)
#define VELOCIDADE_A F_CLK/ADS1256_BAUD // Prescaler do SPI (ads1256)
#define VELOCIDADE_D F_CLK/DAC8568_BAUD // Prescaler do SPI (dac8568)
#define vRef 1.25 // Tensão de referência sobre Termistor
#define vRef_Adc 2.5 // Tensão de ref do ADC
//=====
// DEFINIÇÕES DO SISTEMA
//=====
#define N_PONTOS 500 // Quantidade de Pontos da FBG
#define LAMBDA0 1550 // Comprimento de Onda de Bragg (25°C)
#define T_25 25 // Temperatura Ambiente 25°C
#define KT 0.0000067 // Sensibilidade Térmica da FBG 6,7u/°C
#define LAMBDA_INIT 1549 // Comprimento de Onda Inicial 1549nm
#define R_25 15000 // Termistor de 15K ohms a 25°C
#define R_0 15000 // Resistência do Divisor resistivo
#define BETA 3528 // Beta Termistor
#define DELTALAMBDA 0.004 // Variação do Comprimento de Onda nm
#define SLAVE_ID '0' // Identificação do escravo
//=====
// VARIÁVEIS DA COMUNICAÇÃO
//=====
unsigned char frame_rd[5]; // Frame de leitura
unsigned int pos_frame; // Variável de controle do frame_rd
unsigned char slaveID; // Identificação do Escravo
unsigned char fn; // Função
unsigned int dado; // Dados
unsigned char char_term = '/'; // Caracter de terminação
//=====
// FLAGS
//=====
unsigned int flag_rd = false; // Flag que indica que a comunicação pronta!
//=====
// VARIÁVEIS DO SISTEMA
//=====
// Variavel para armazenar os pontos da FBG
unsigned int fbg[N_PONTOS + 1] = {113,156,192,213,218,204,174,132,87,45,15,0,6,31
,71,121,171,214,243,252,240,208,163,110,61,22,2,4,29,73,129,188,241,278,293,284
,251,201,140,81,33,5,2,27,75,140,210,274,322,345,340,306,249,179,108,47,9,1,25,78
,153,236,316,378,411,411,376,312,230,143,68,16,0,23,82,170,271,370,450,498,505,469
,396,299,192,96,27,0,21,88,193,317,442,547,614,631,596,512,393,260,136,44,1,19,98,225
,383,544,684,778,810,774,675,528,357,194,68,4,19,113,275,481,696,887,1020,1075,1038,916
,727,501,279,103,9,20,141,359,639,939,1208,1403,1491,1453,1294,1037,723,409,155,15,26,199
,514,925,1368,1770,2065,2203,2158,1930,1552,1084,611,226,18,50,341,860,1531,2247,2893,3363
,3578,3494,3112,2480,1698,911,291,6,172,821,1876,3175,4506,5656,6440,6726,6444,5593,4267
,2675,1158,162,125,1305,3634,6717,9994,12918,15059,16105,15820,14008,10573,5831,1276
,390,6870,19565,32940,43333,50373,54931,57881,59823,61133,62037,62676,63135,63469
,63714,63894,64023,64112,64169,64196,64196,64169,64114,64025,63896,63717,63473
,63140,62684,62048,61148,59845,57913,54980,50447,43445,33096,19741,6998,419,1236
,5774,10527,13981,15812,16113,15079,12947,10028,6750,3660,1322,130,157,1148,2664
,4258,5588,6442,6729,6445,5663,4514,3182,1882,824,174,6,290,910,1698,2481,3113,3496
,3580,3364,2893,2246,1530,858,339,49,19,228,614,1089,1557,1934,2161,2204,2064,1767
,1363,920,509,195,25,16,159,415,730,1043,1300,1457,1491,1401,1203,932,632,352,137
,18,10,108,286,509,735,923,1042,1075,1018,881,688,472,268,108,16,6,72,201,366,536
,682,779,811,775,678,536,374,217,91,17,2,48,144,269,403,519,601,633,612,541,434
,308,184,81,17,1,32,104,202,308,405,475,506,495,444,361,261,160,75,19,0,20,75,153
,240,321,382,413,410,372,307,226,143,70,20,0,13,54,117,189,259,313,343,344,317,266
,200,129,67,21,1,8,39,90,151,210,259,288,293,274,233,178,119,64,23,2,4,28,70,121,173
,216,244,252,239,207,161,110,62,24,3,2,20,54,98,143,182,209,219,210,185,147,102,60
,25,4,1,14,42,79,119,155,180,191,186,166,134,96,58,26,6,0,10,32,64,99,132,156,168
,166,150,124,91,56,27,7,0,6,25,52,83,113,136,149,149,137,114,86,55,28,9,0,4,19};
unsigned int pos_fbg = 0; // Variável para varrer os pontos da FBG
float vTH; // Vth = Tensão no Termistor
unsigned long int adcl_dado_vth; // Leitura do ADC
float deltaLambdaB; // Variacao do Comprimento de Onda de Bragg
float temp_Interface = 25; // Temperatura definida pela Interface
float i; // Índice do perfil da grade de Bragg
float lambda0; // Comprimento de Onda do Laser
float temp0; // Temperatura do Laser
float dac_out;
//=====
// DECLARAÇÃO DE FUNÇÕES
//=====
void fn_01(void); // Recebe a Temperatura da Interface
float calc_temp_Laser(void); // Calcula a Temperatura do Laser
float calc_lambda0(void); // Calcula o comprimento de onda do Laser
float conv(void); // Algoritmo de Convolução

```



```

    frame_rd[pos_frame] = UCA1RXBUF;           // Recebe o Buffer RX
    pos_frame++;                               // Incrementa posição do frame
    if(frame_rd[pos_frame - 1] == '/'){       // Caracter de Terminação ?
        flag_rd = true;                       // Comunicação pronta!
    }
    break;

    case 4:break;                               // Vector 4 - TXIFG
    default:break;
}
}
//=====
//                               FN_02 - Envia a Tensão VTH para a Interface
//=====
void fn_01(void){
    temp_Interface = data/655.35;
    // Calcula a variação do comprimento de onda da Grade
    deltaLambdaB = (temp_Interface - T_25)*KT*LAMBDA_B;
}
//=====
//                               Calcula a Temperatura do Laser
//=====
float calc_temp_Laser(void){

    float t_Laser;
    float Rth;

    Vth = ((float)adcl_dado_vth * 2 * vRef_Adc)/(2*8388607); // Tensão do Termistor
    Rth = R_0*(vRef - Vth)/(Vth); // Resistência do Termistor
    t_Laser = (1/(1/(T_25+273.15)+log(Rth/R_25)/BETA)) - 273.15; // Temperatura do Laser

    return t_Laser; // Retorna para temp0
}

float calc_lambda0(void){

    float lambdaLaser;

    lambdaLaser = 0.092669*temp0+1547.859392; // Comprimento de Onda do Laser

    return lambdaLaser;
}
//=====
//                               Algoritmo de Convolução
//=====
float conv(void){

    float m;
    float x1;
    float x0;
    float conv;

    i = (lambda0 - (LAMBDA_INIT + deltaLambdaB))/DELTALAMBDA; // Calcula o índice
    if ((i >= 0) | (i <= N_PONTOS)){
        x0 = floor(i); // Arredondamento inferior
        x1 = ceil(i); // Arredondamento Superior
        if(x1 == x0){
            x1++;
        }
        m = ((float)fbg[(unsigned int)x1] - (float)fbg[(unsigned int)x0])/(x1-x0); // Coef Angular
        conv = m*(i-x0)+(float)fbg[(unsigned int)x0]; // Convolução
    }
    else{
        conv = 0x0000;
    }

    return conv;
}
//=====

```