



CIRCUITO ELETRÔNICO PARA EMULAÇÃO DE SENSORES EM FIBRAS ÓPTICAS COM GRADES DE BRAGG EXCITADOS POR LASERS SEMICONDUTORES COM MÓDULOS TERMOELÉTRICOS

Pedro Carvalhaes Dias – email: pedro.carvalhaes.dias@gmail.com
CEATEC/Pontifícia Universidade Católica de Campinas - PUC

Rod. D. Pedro I, km 136
13086-900 – Campinas – SP

Elnatan Chagas Ferreira – email: elnatan@demic.fee.unicamp.br
DEMIC/FEE/UNICAMP

Caixa Postal 6101
13083-970 – Campinas - SP

Maurício Silveira – email: msilveira@puc-campinas.edu.br
CEATEC/Pontifícia Universidade Católica de Campinas - PUC

Rod. D. Pedro I, km 136
13086-900 – Campinas – SP

***Resumo:** Este trabalho apresenta um circuito desenvolvido para permitir a realização de experimentos em laboratório envolvendo interrogadores eletrônicos para sensores com grades de Bragg em fibras ópticas. Os lasers semicondutores DFB são elementos que facilmente são queimados ao serem empregados em laboratórios, e junto com as grades de Bragg e os outros componentes ópticos de um sistema de interrogação convencional, têm custo muito alto (da ordem de grandeza de um osciloscópio digital), e as escolas de engenharia não podem, em geral, disponibilizar estes componentes para experimentos em laboratórios de graduação. O circuito desenvolvido emula o comportamento de um sistema laser+sensor com grade de Bragg+módulo termoeletrico, permitindo que os alunos realizem experimentos com interrogadores destes sensores sem utilizar os componentes ópticos de alto custo necessários em um sistema de medidas convencional.*

***Palavras-chave:** Laboratório de graduação, Sensores com grades de Bragg, Circuitos emuladores, Sensores a fibras opticas.*

1 INTRODUÇÃO

Sensores com grades de Bragg em fibras ópticas (FBG) estão se tornando muito importantes em diversas áreas da instrumentação (LEITE, 2006), sendo altamente desejável a introdução destas novas técnicas de medida nos cursos de graduação em engenharia elétrica. Embora estas novas técnicas possam ser ensinadas facilmente em aulas teóricas das disciplinas que



enfocem medidas, instrumentação e sensores, a realização de experimentos em laboratório com lasers e FBGS é praticamente inviável, devido não apenas ao alto custo do material, mas a sua extrema fragilidade.

Mesmo em países onde os recursos para o ensino de engenharia são muito mais abundantes e os laboratórios de graduação são muito bem equipados, o emprego de lasers semicondutores e FBGs é um problema, pois os custos de manutenção dos laboratórios fica muito alto. Isso ocorre pois os lasers semicondutores DFB necessários queimam com extrema facilidade – e sem explicação ou motivo aparente – mesmo quando manipulados por pessoal experiente (WIEMAN, 2001). Como o custo de um laser DFB que inclui o módulo termoeletrônico Peltier (TEC) no encapsulamento, necessário para o funcionamento dos interrogadores dos sensores, é similar ao custo de um osciloscópio digital, é economicamente inviável para a maioria das escolas de engenharia no Brasil manter um experimento deste tipo.

Portanto, para viabilizar a realização de experiências com os sistemas de interrogação dos sensores, foi desenvolvido um circuito eletrônico que emula o comportamento do conjunto de sensoramento constituído por um sensor com grade de Bragg, um laser semicondutor DFB, um elemento termoeletrônico TEC e um fotodiodo.

2 UM SISTEMA TÍPICO DE INTERROGAÇÃO COM SENSOR DE FBG

Recentemente foram apresentados sistemas de interrogação de sensores com FBG que apresentam alto desempenho e são implementados fundamentalmente com circuitos eletrônicos que utilizam o elemento termoeletrônico TEC disponível no encapsulamento do laser semicondutor para: a) fazer uma varredura (em comprimento de onda λ) e obter o perfil da FBG (ALMEIDA, 2009), b) sintonizar e estabilizar o sinal de saída do laser em um ponto de operação da FBG e medir as variações do comprimento de onda do ponto de operação (COSTA, 2009), (SIQUEIRA DIAS, 2008) ou ainda, quando se deseja medir sinais de perturbações ac, detectar as variações de amplitude em torno deste ponto de operação (LEITE, 2006).

Em todos estes interrogadores, o elemento responsável por varrer o laser ao longo de sua faixa de operação de comprimento de onda é o TEC, que é excitado por uma tensão de controle gerada no interrogador.

Como o emulador apresentado neste trabalho é capaz de operar com os três tipos de interrogador descritos anteriormente, na Figura 1 é apresentado o diagrama de blocos de um interrogador que permitiria fazer os três tipos de medida. Na prática, devido à alta complexidade do sistema eletrônico necessário para implementar o interrogador, normalmente ele é projetado e construído para realizar apenas um tipo de medida.

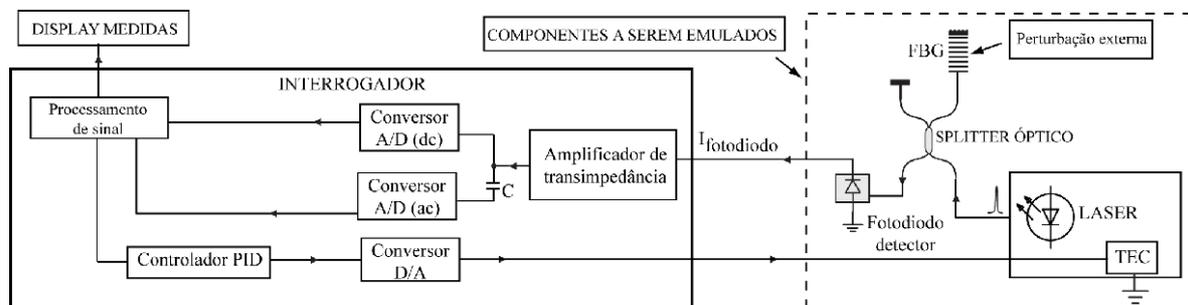


Figura 1 – Diagrama de blocos dos interrogadores eletrônicos dos sensores a FBG.

2.1 Resposta da FBG a um sinal de varredura de luz

Uma FBG funciona como um filtro sintonizado, sendo que sua frequência central é uma função das características físicas da grade. Quando a grade é iluminada por um sinal de luz, a luz é refletida ou transmitida de acordo com o perfil da FBG, conforme é apresentado na Figura 2.

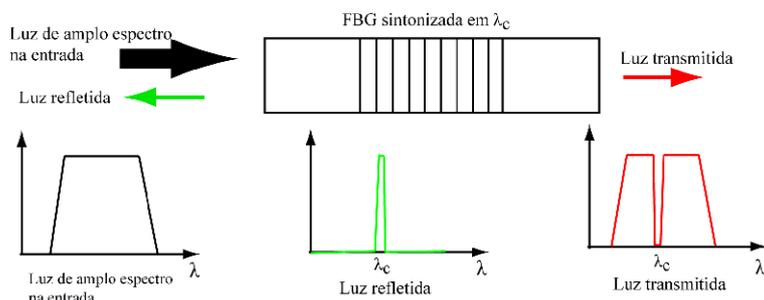


Figura 2 – Princípio de funcionamento de uma FBG.

A sintonia e o formato do perfil da FBG dependem de vários parâmetros de fabricação, e podem ser escolhidos pelo fabricante, de acordo com a aplicação. Na Figura 3 é apresentado um gráfico do perfil medido em uma FBG, medido com um Analisador de Espectro Óptico.

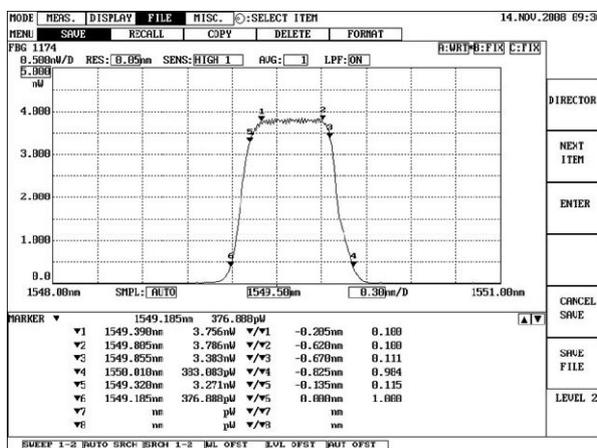


Figura 3 – Perfil de uma FBG medido com um analisador de espectro óptico.



Como as características da FBG variam com as perturbações externas, a sua sintonia (λ_c – comprimento de onda central), muda, já que existem uma alteração nas dimensões da grade devido ao alongamento da FBG causado pela perturbação externa. É através da medida (direta ou indireta) do perfil ou de um ponto específico no perfil, como por exemplo λ_c , que é possível determinar o valor da perturbação externa.

No caso das FBGs, quando o mensurando é a temperatura, as curvas de $\lambda_c \times T$ são lineares, como apresentado na Figura 4, onde se vê o resultado medido de λ_c em uma FBG em função da temperatura.

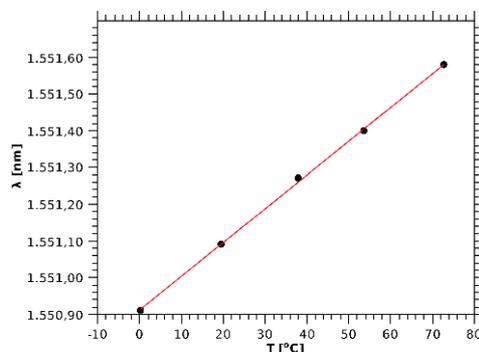


Figura 4 – Medida da frequência central λ_c de uma FBG em função da temperatura.

Portanto, para emular o comportamento de uma FBG que é varrida por um laser dentro de toda a sua faixa de operação de comprimento de ondas, é necessário realizar um circuito que, ao ser excitado por uma tensão originada no interrogador (a tensão que irá excitar o TED do laser), permita obter uma corrente de saída (a corrente no fotodiodo detector da luz refletida pela FBG) com os diversos perfis típicos de uma FBG.

3 PROJETO DO CIRCUITO DO EMULADOR ELETRÔNICO

O objetivo do emulador é permitir que seja possível realizar experimentos com circuitos de interrogação de sensores de FBG sem que seja necessário usar nenhum dos componentes ópticos de um sistema de medidas convencional. A resposta esperada para o circuito do emulador ao ser excitado por uma tensão adequada (que seria a tensão de entrada do *driver* do TEC), é uma saída em corrente que reproduza uma resposta semelhante ao perfil completo de uma FBG, com borda de subida, patamar e borda de descida.

3.1 Características desejadas para o circuito emulador

Do perfil medido em uma FBG (Figura 3) pode-se observar que a FBG possui resposta praticamente contante na banda de passagem (refletindo uma potência praticamente constante de aproximadamente 3,7 nW entre os pontos 1 e 2 do gráfico apresentado). Fora da banda de passagem (para comprimentos de onda $\lambda < 1549$ nm e $\lambda > 1550,1$ nm, a potência refletida é



zero. Outra característica importante é que as bordas da grade são bastante abruptas, saindo de zero de potência e atingindo o máximo (3,7 nW) em cerca de 0,39 nm e caindo do máximo para zero em aproximadamente 0,30 nm.

Como visto na Figura 4, as perturbações externas atuando sobre a FBG (no caso a temperatura) fazem com que o seu perfil se desloque no eixo do comprimento de onda. Logo, o emulador da FBG deve ser um circuito que, ao ser excitado pela tensão que o interrogador sob experimentação aplica ao TEC, além de apresentar uma curva com perfil semelhante ao da Figura 3, também possa ter sua sintonia (λ_c) alterada, para simular variações de temperatura/força aplicadas sobre a FBG.

O circuito emulador da FBG é baseado na característica de transferência de um par diferencial. Para um par diferencial como o apresentado na Figura 5, é possível calcular a função de transferência do par, $I_C \times V_i$ simplesmente equacionando as correntes de coletor dos transistores em função da tensão de entrada.

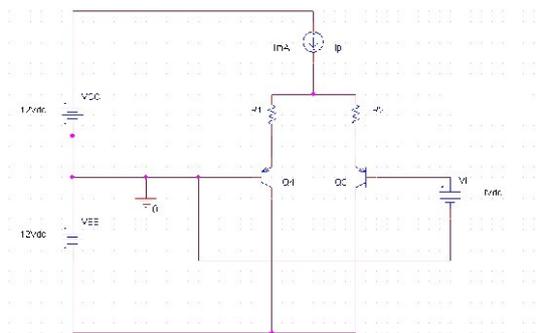


Figura 5 – Par diferencial alimentado por fonte de corrente

Assumindo que $R_1 = R_2 = 0$ e que uma das entradas do par diferencial (base de Q4) esteja em terra, aplicando-se uma tensão de entrada V_i no outro terminal de entrada (base de Q3) e lembrando que a corrente de coletor em um transistor bipolar é dada por $I_C = I_S \exp(V_{be}/V_T)$, onde $V_T = kT/q$ (Gray,2001), pode-se escrever que:

$$I_C(Q4) = I_p \left(1 - \frac{1}{\frac{I_{S4}}{I_{S3}} \exp(V_i/V_T)} \right) \quad (1)$$

Note-se que $I_C(Q3)$ é simplesmente dado por $I_C(Q3) = I_p - I_C(Q4)$, já que a soma das correntes de Q3 e Q4 é constante e igual a I_p . As curvas de transferência, $I_C(Q3)$ e $I_C(Q4)$ em função de V_i , como será visto nas simulações apresentadas a seguir, apresentam o comportamento desejado, que é muito semelhante às bordas de subida e descida de uma FBG.



Outro fator muito interessante em relação ao uso de um par diferencial para gerar eletronicamente o perfil das bordas da FBG é que a utilização de resistores de degeneração nos emissores do par faz com que o perfil da função $I_c(Q4)$, $I_c(Q4)$ em função de V_i possa ser alterado facilmente (GRAY, 2001), permitindo emular FBGs com perfis diferentes simplesmente alterando os valores estes resistores.

Este efeito pode ser observado nos resultados da simulação PSPICE realizada com o bloco do par diferencial, apresentada na Figura 6, onde cada uma das curvas de transferência $I_c(Q3)$ em função de V_i apresentadas foi obtida com resistores de 0, 200, 400, 600, e 800 Ω de degeneração nos emissores.

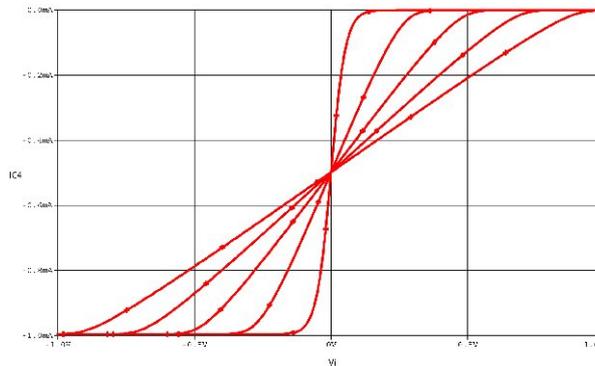
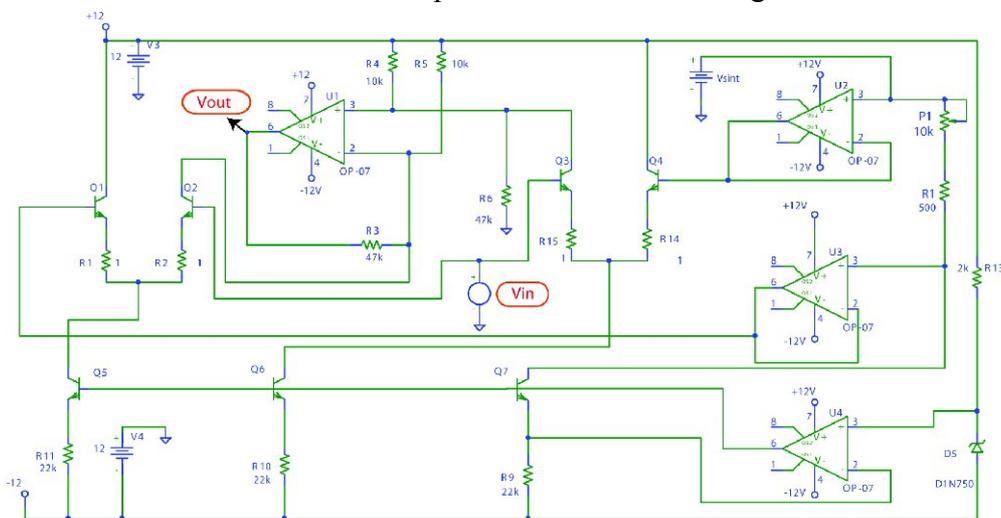


Figura 6 - Perfis de bordas de subida emulados usando o circuito desenvolvido, para resistores de degeneração variando de 0 a 800 Ω , de 200 em 200 Ω .

No entanto, devido à necessidade de operação de emular as duas bordas (subida e descida) com um patamar separando os dois lados da grade, foram usados dois pares diferenciais, como mostrado no circuito desenvolvido para este emulador na Figura 7.



Q1, Q2, Q3, Q4, Q5, Q6 e Q7 - Transistores de CIs LM3046

Figura 7 - Circuito do emulador do laser e FBG.



Os dois pares diferenciais são alimentados pela tensão de varredura V_i que é usada para excitar o TEC do laser, e as correntes de coletor obtidas nos transistores de saída dos dois pares diferenciais são enviada a um op-amp, que além de funcionar como transimpedância, convertendo estas correntes em tensão, realiza a operação de diferença entre as tensões geradas, criando a tensão de saída desejada V_{out} .

As tensões de polarização das bases dos transistores dos dois pares diferenciais, que são fixas e determinam onde cada um dos pares diferenciais inicia a condução, são fornecidas pela queda de tensão sobre $P1 + R1$. Como esta queda de tensão é controlada por uma fonte de corrente constante definida pelo transistor $Q7$, variando-se o valor de $P1$ é possível aumentar ou diminuir esta diferença de tensões aplicadas nas bases de $Q1$ e $Q4$, alterando o tamanho do patamar máximo do perfil da grade emulada.

Por outro lado, esta diferença de tensão dada por $V_{dif} = IC(Q7) \cdot (P1 + R1)$ está referenciada a uma tensão que vem de uma fonte variável V_{sint} , fazendo com que seja possível controlar também o valor de tensão inicial onde os pares diferenciais iniciam a condução, ou seja, permite variar a posição do início do perfil de subida da FBG em relação à tensão de entrada V_i . Na Figura 8 é apresentado o resultado de simulação feita no PSPICE, para variações no valor de $P1$, gerando diversos tipos de patamares para o perfil emulado.

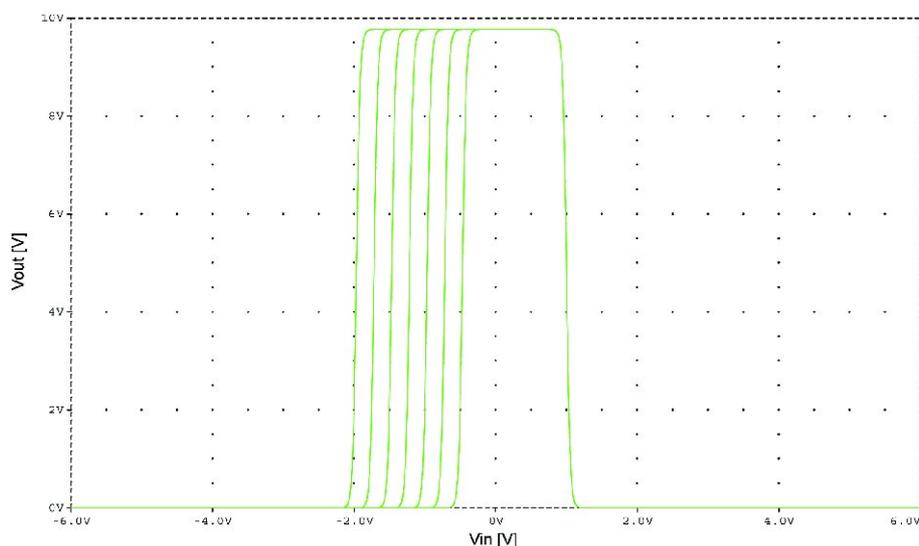


Figura 8 - Simulação do circuito do emulador, para diversos valores de $P1$, gerando perfis de grades com diferentes larguras.

Na Figura 9 é apresentado, para um patamar fixo, o resultado de simulação feita no PSPICE para V_{sint} variando, gerando inícios de perfil emulado em diferentes posições em relação à tensão de varredura V_i . É interessante notar que, como o par diferencial $Q1-Q2$ é responsável pela emulação da borda de subida e o par $Q3-Q4$ é responsável pela emulação da borda de descida, é possível emular grades assimétricas, variando-se o grau de degeneração dos



emissores de cada um dos pares de forma diferente. Aumentando-se os resistores R1-R2 diminui-se a inclinação da borda de subida, enquanto que aumentando-se os valores de R3-R4 diminui-se a inclinação da borda de descida.

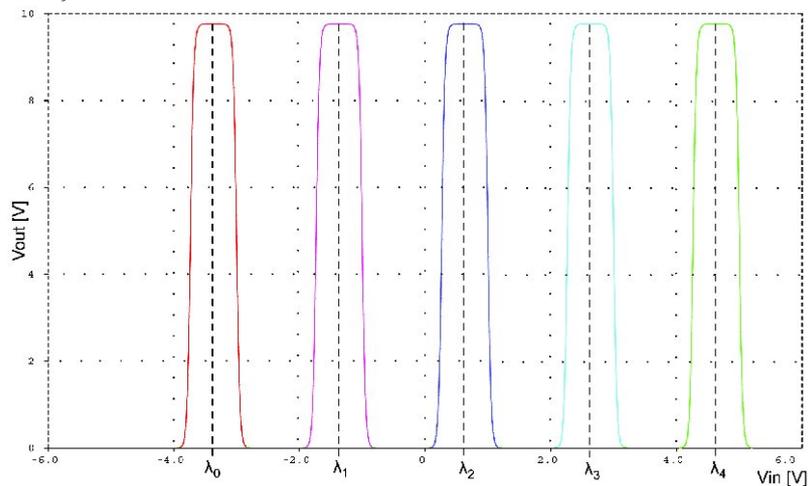


Figura 9 - Simulação do circuito do emulador mostrando a possibilidade de variar o ponto central de sintonia do perfil emulado.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Foi construído um protótipo do emulador para avaliar a sua aplicação em laboratórios de graduação, tendo sido utilizado para seu emprego o circuito de um interrogador já desenvolvido e validado (ALMEIDA, 2009). O circuito fabricado para o emulador é apresentado na Figura 10. O primeiro protótipo possui alguns erros no lay-out (corrigidos por ligações realizadas com fios, como se vê), e uma nova versão do circuito já se encontra em desenvolvimento.

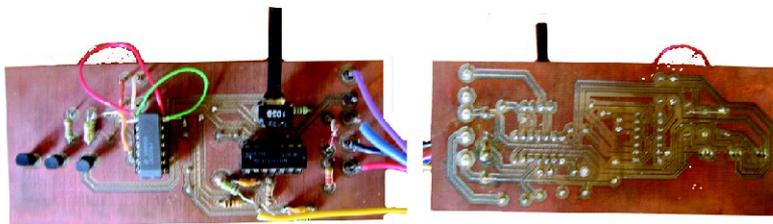


Figura 10 – Primeira versão do protótipo do emulador eletrônico desenvolvido.

Para avaliar o protótipo, foi idealizado um experimento onde a FBG seria varrida em todo o seu intervalo de operação, usando um microcontrolador e um conversor D/A para gerar as tensões aplicadas na entrada do emulador, e os valores da fotocorrente que seria obtida no detector óptico (saída do emulador) eram convertidos para tensão por um amplificador de transimpedância e lidas em um conversor A/D no microcontrolador. O resultado da medida



feita neste experimento é apresentada na Figura 11, onde se vê o perfil medido de uma FBG totalmente emulada eletronicamente.

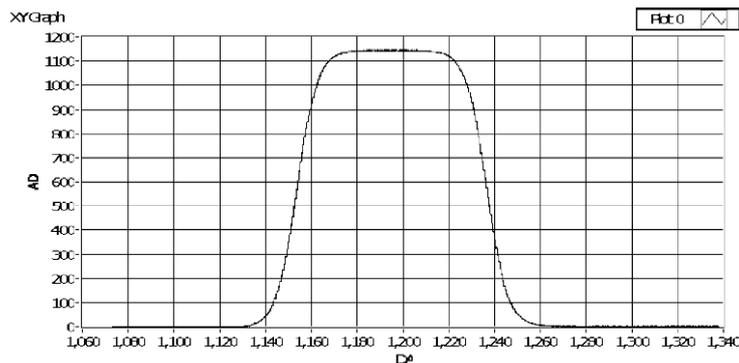


Figura 11 – Resultado da medida de uma FBG em um experimento de laboratório, usando o emulador.

5 CONCLUSÕES

Foi desenvolvido um circuito eletrônico que permite emulador um sistema de sensoriamento com grades de Bragg em fibras ópticas iluminadas por lasers semicondutores sintonizados por módulos termoelétricos. O circuito desenvolvido permite que todas as características de um sensor com FBG possam ser emuladas, fazendo com que os experimentos desenvolvidos com sistemas de interrogação baseados nestes componentes possam ser extremamente realistas em termos de operação e resultados obtidos.

O circuito é de baixíssimo custo, viabilizando a montagem de experiências em cursos de graduação com estes sistemas, já que o circuito desenvolvido substitui um conjunto de componentes ópticos e um laser semiconductor que, além de extremamente caros, podem ser facilmente destruídos quando manipulados em laboratórios de graduação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, R. R. **Nova técnica para medida de temperatura em sensores a fibras ópticas com FBG**. Campinas, SP, 2009. Dissertação (Mestrado) – Unicamp.

Dias, J.A.S., Leite, R.L., Ferreira, E.C., Electronic technique for temperature compensation of fibre Bragg gratings sensors. **International Journal of Electronics and Communication**, (62):72–76, 2008.

Costa, E. F. **Nova técnica eletrônica para medida e temperatura com resolução de 0,5 m° C usando sensores de fibras ópticas com grades de Bragg**. Campinas, SP, 2009. Dissertação (Mestrado) – Unicamp.



Gray, P.R., Hurst, P.J., Lewis, S.H., Meyer, R.G. **Analysis and Design of Analog Integrated Circuits**, Fourth Edition. J. Wiley, New York, 2001.

Leite, R. L. **Uma contribuição ao estudo e desenvolvimento de sensores de alta tensão baseados em fibras ópticas**. Campinas, SP, 2006. Tese (Doutorado) – Unicamp.

Wieman, C. E., Hollberg L. Using diode lasers for atomic physics. **Review of Scientific Instruments**, (62):72–76, 1991.

ELECTRONIC CIRCUIT FOR THE EMULATION OF FIBER BRAGG GRATINGS SENSOR DRIVEN BY SEMICONDUCTOR LASERS WITH THERMOELECTRICAL MODULES

Resumo: *This work presents a circuit developed for application in undergraduate laboratory experiments involving interrogators for fiber Bragg gratings sensors illuminated by semiconductors lasers. The semiconductors lasers are easily burned when used in laboratories experiments and, as well as the other necessary optical devices required for an interrogation system, present high cost (similar to a digital oscilloscope), and the schools of engineering generally cannot afford to offer these devices in undergraduate laboratory experiments. The developed circuit emulates the behavior of a laser+fiber Bragg grating+thermoelectrical cooler system, allowing for the realization of low cost experiments using these system with electronic interrogators by the students.*

Palavras-chave: *Undergraduate laboratory, Fiber Bragg sensors, Emulation circuits, Fiber optics sensors.*