

# Sistema de Leitura de Redes de Bragg para Medidas Estáticas e Dinâmicas

Cicero Martelli, Jean Carlos Cardozo da Silva, Paulo José Dantas Novaes e Hypolito José Kalinowski

Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Av. Sete de Setembro 3165, 80230-901, Curitiba, PR

Recebido em 5 de Junho, 2003. Versão final recebida 20 de Janeiro, 2004

Este trabalho apresenta um sistema para leitura de redes de Bragg aplicável a medidas estáticas e dinâmicas. O sistema proposto tem como características o baixo custo e a facilidade de implementação, quando comparado a outros instrumentos, e permite o emprego de diferentes técnicas de demodulação, como os métodos do filtro de borda (*edge filter method*) ou do filtro sintonizável (*tunable filter method*). O aparelho pode ser acoplado a sistemas de aquisição comerciais, pois o sinal analógico de saída está condicionado entre 0 V e 5 V. Sua aplicação em ensaios para avaliar a dinâmica de uma viga engastada e em medidas de temperatura é apresentada e discutida.

In this paper we present a fiber Bragg grating interrogation system for static and dynamic measurements. The proposed system has low cost and it is easy to assemble when compared to other available instruments. It can be used with different demodulation techniques, such as the edge filter method and the tunable filter method. The signal output of the instrument ranges between 0 V to 5 V and is compatible to standard PC interfacing systems. Its application to the analysis of the dynamic properties of a cantilever beam as well as to temperature measurements is presented.

## 1 Introdução

Sistemas sensores para o estudo de vibrações mecânicas e variações de temperatura, que utilizam como elemento sensor a rede de Bragg em fibra ótica (FBG), são promissores em virtude das pequenas dimensões, inércia química, imunidade eletromagnética, alta sensibilidade, possibilidade de monitoração remota etc. Recentemente tais sistemas têm sido desenvolvidos para monitorar estruturas sujeitas a vibrações e variações térmicas [1,2], situadas em ambientes inadequados para o emprego exclusivo de sensores elétricos, como, por exemplo, alto nível de poluição com substâncias explosivas, ambientes de alta tensão, ou com presença de forte campo eletromagnético [3]. A FBG apresenta-se como alternativa adequada nesse tipo de situação.

A rede de Bragg em fibra consiste na modulação periódica do índice de refração do núcleo da fibra ótica. A luz guiada ao longo do núcleo da fibra ótica é refletida por cada plano (região de interface no perfil longitudinal do

índice de refração) da rede. Para as frequências que não satisfazem a condição de Bragg, a luz refletida por cada plano subsequente torna-se progressivamente fora de fase e eventualmente se cancela. Quando a condição de Bragg é satisfeita, a parcela da luz refletida por cada plano da rede contribui construtivamente na direção contra propagante, formando uma banda de reflexão com comprimento de onda central definido pelos parâmetros da rede [1]:

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

onde  $\lambda_B$  é dito o comprimento de onda de Bragg,  $n_{eff}$  é o índice de refração efetivo para o modo de propagação e  $\Lambda$  é o período espacial da rede.

A existência de esforço mecânico longitudinal ou variação de temperatura sobre uma rede de Bragg provoca, devido aos efeitos foto-elástico e termo-ótico, o deslocamento do comprimento de onda de Bragg, descrito pela equação [2]:

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

onde  $l$  é o comprimento da rede de Bragg,  $T$  é a temperatura e  $\Delta T$  é a variação de temperatura.

É a variação do comprimento de onda de Bragg, descrita pela equação (2), que permite o uso de FBG como sensores para deformação ou temperatura pela simples leitura, no domínio ótico, da frequência (comprimento de onda) de pico da banda de reflexão.

A monitoração de redes de Bragg em fibra ótica pode ser feita mediante diferentes técnicas. A leitura da frequência ótica (comprimento de onda) da FBG oferece uma série de vantagens, como: alta precisão; independência de calibração em intensidade ótica, visto medir frequência luminosa; e a capacidade de multiplexação de vários sensores. No entanto, um analisador de espectro ótico (OSA), equipamento utilizado para tais medidas, tem custo elevado.

A detecção homódina ou heteródina é outra técnica de monitoração empregada, onde a variação da fase do sinal medido em relação à fase do sinal modulado de entrada fornece a posição espectral da FBG sensora. Esta é também uma técnica precisa. No entanto, tanto o sistema ótico, quanto o sistema de detecção necessitam ser muito estáveis. Como exemplo têm-se os sistemas de demodulação com interferômetros Fabry-Perot [5] e com interferômetros Mach-Zehnder [4].

Sistemas com redes de Bragg como referência ótica [6, 7] têm sido largamente empregados na monitoração de redes de Bragg. Entre as suas características relevantes estão a baixa complexidade do projeto e a relativa simplicidade dos componentes opto-eletrônicos. Entretanto, por serem baseados em medição de intensidade ótica, a calibração deve ser feita cada vez em que o equipamento for utilizado.

O sistema proposto neste trabalho é baseado na detecção por intensidade ótica e contém compensações contra flutuações de potência ótica provenientes de oscilações da fonte ótica, da conectorização e de curvaturas das fibras óticas. São elas: estabilização térmica em 15 °C do LED com termo-elemento Peltier e sistema de divisão do sinal do sensor por sinal de referência do circuito ótico. O sistema proposto apresenta custo relativamente baixo de fabricação (US\$ 1.000) e facilidade de implementação.

## 2 Sistema de Leitura de Redes de Bragg

O sistema de leitura das redes de Bragg é composto por três módulos: circuito emissor, circuito ótico e circuito de demodulação (vide figura 1), cujos esquemáticos dos circuitos desenvolvidos são apresentados no apêndice.

O circuito emissor é constituído por uma fonte de corrente modulada por onda senoidal em 2 kHz. O sinal resultante é aplicado a um LED com comprimento de onda central de 1540 nm e largura de faixa espectral de 60 nm. A temperatura do LED é controlada por um termo elemento (Peltier), aumentando a estabilidade da fonte ótica.

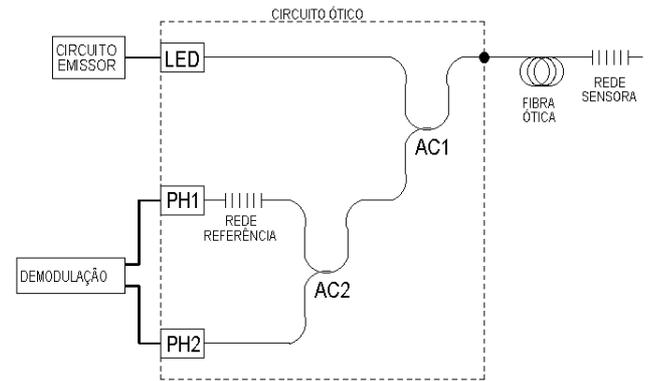


Figura 1. Esquema do sistema de leitura de redes de Bragg.

A configuração do circuito ótico apresentado na figura 1 foi escolhida por causa das seguintes vantagens, quando comparada a outros sistemas de interrogação de redes de Bragg existentes (capítulo 7 da referência [1] e [7]): baixo custo, relativa facilidade de implementação, portabilidade e robustez. Nesse circuito, a luz proveniente da fonte ótica de banda larga é direcionada através do acoplador AC1 para a rede sensora, que reflete os comprimentos de onda ressonantes no sentido da rede de referência. A rede de referência tem o mesmo comprimento de onda da rede sensora. Quando a rede sensora é submetida à deformação ou à variação de temperatura, o comprimento de onda de Bragg é alterado. Desta forma a luz refletida pela rede sensora deixa de estar em sintonia com a rede de referência e assim o fotodetector PH1 recebe potência ótica proporcional.

Uma parcela do sinal proveniente da rede sensora é guiada ao fotodetector PH2 (através de AC2) e utilizado como referência para corrigir eventuais flutuações de potência ótica. Assim a razão PH1/PH2 permanece proporcional à grandeza medida.

A rede de referência pode ter diferentes características óticas de acordo com aquelas desejadas para o sistema. Quando se deseja maior faixa dinâmica de medição (que corresponderá a um maior deslocamento espectral), utiliza-se uma rede com largura espectral maior, porém perde-se sensibilidade. Por outro lado, para maior resolução utiliza-se rede com largura espectral menor.

A região de operação do sistema é compreendida na faixa espectral onde ocorre máxima e mínima convolução entre os espectros de reflexão da rede sensora e o de transmissão da rede de referência (figura 2) [8]. Desta forma um valor de potência ótica corresponde a apenas um valor de variação do espectro da rede sensora associada

O circuito eletrônico de demodulação (figura 3) é similar a um demodulador AM, porque o sinal de interesse modula a portadora ótica em amplitude (devido à variação da posição da banda da rede sensora). Os sinais óticos incidentes em PH1 e PH2 são convertidos em sinais elétricos pelos amplificadores de transimpedância ( $a$  e  $o$ ). Devido à baixa intensidade dos sinais óticos, o amplificador operacional empregado nesse estágio deve apresentar baixo ruído e alto ganho. Foram utilizados amplificadores OPA602 da

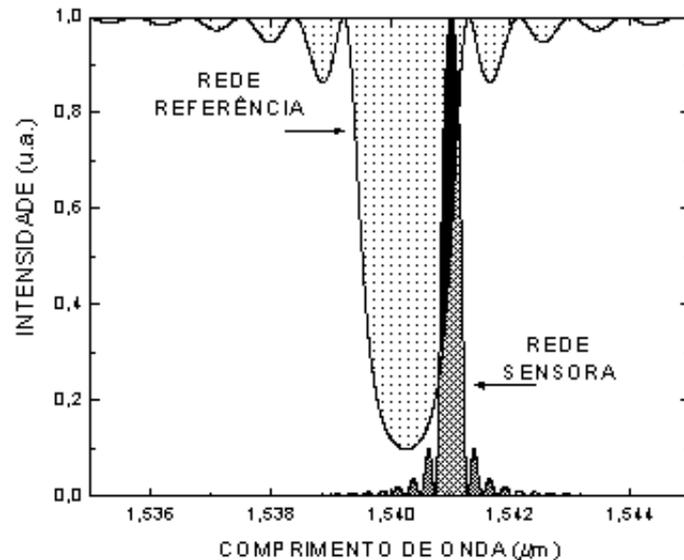


Figura 2. Representação dos espectros do sistema de leitura implementado das redes de referência (filtro) e sensora. A área em preto representa a região rejeitada pelo filtro.

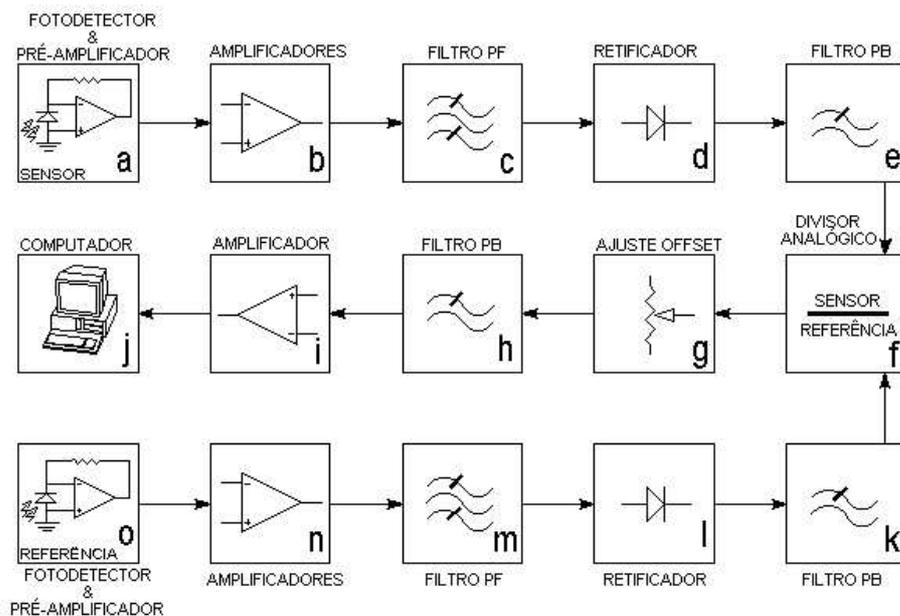


Figura 3. Esquemático do circuito eletrônico de detecção do sinal óptico de redes de Bragg.

BURR-BROWN, que são específicos para conversão optoeletrônica e apresentam baixo ruído e baixo tempo de resposta. O sinal elétrico passa pelos estágios de amplificação (*b* e *n*), que consistem de dois amplificadores em cascata na configuração não-inversora. O ganho em cada um dos estágios de amplificação pode ser ajustado, permitindo adequar o sistema a maiores ou menores perdas no enlace óptico entre o ponto de sensoriamento e a unidade eletrônica. Em seguida são filtrados nos filtros passa faixa ativos centrados em 2 kHz (*c* e *m*), a frequência de modulação da portadora

óptica. O próximo estágio consiste da retificação do sinal em onda completa (*d* e *l*), com o que a frequência dos sinais passa a ser 4 kHz. Os sinais são ainda filtrados por um filtro passa baixas ativo com frequência de corte de 300 Hz (*e* e *k*) para se obter o sinal que contém a informação da rede sensora. Essa frequência (300 Hz) foi escolhida por especificação das normas de vibrações em cabos condutores [9], uma das aplicações proposta para o sistema. Para medidas estáticas, pode-se trabalhar com frequência de corte

menor, o que reduz ruídos provenientes dos fotodetectores e ruídos do próprio circuito de demodulação.

Os sinais elétricos, provenientes do sensor e da referência, são divididos por um divisor analógico (AD 538 - *Analog Device*) ( $f$ ). O sinal resultante passa por ajuste de *offset* ( $g$ ), filtro passa baixas ativo com frequência de corte de 300 Hz ( $h$ ) e é finalmente amplificado e condicionado na escala de 0 – 5 V ( $i$ ). Com o tratamento analógico do sinal resultante, é possível acoplar o aparelho a outros sistemas de aquisição, como, por exemplo, o sistema de aquisição *Lynx ADS2000* que possui entradas para diversos tipos de sensores (extensômetros elétricos de resistência, acelerômetros e sensores de deslocamento, entre outros).

### 3 Medidas de Vibrações Livres de uma Viga em Balanço

Com objetivo de caracterizar o sistema de leitura de redes de Bragg, é apresentado o resultado de ensaio dinâmico em uma viga de madeira laminada colada (MLC) e comparando a outros sensores elétricos comerciais - extensômetro elétrico de resistência (EER) e acelerômetro.

O sistema é submetido a vibrações livres induzidas por remoção súbita de carga. O resultado é a indicação da frequência natural dessa vibração [10]. Esta informação pode ser usada para o cálculo da rigidez efetiva do material que constitui o sistema que está sendo analisado. Esse método de ensaio é classificado como um ensaio não destrutivo e é caracterizado pela rapidez e facilidade de ser executado além de fornecer informações correspondentes ao meio material que constitui o sistema.

Neste trabalho o corpo-de-prova utilizado nos ensaios quase estáticos e dinâmicos constitui-se de uma viga MLC com seção transversal de 12x20 cm e 190 cm de comprimento. Foram instalados um acelerômetro com capacidade de 2 g, um extensômetro elétrico de resistência de 120  $\Omega$  e um sensor ótico (FBG). A viga de MLC foi engastada em uma das extremidades através de braçadeiras de aço. Os sensores foram posicionados de forma a obter a melhor resposta; o acelerômetro foi posicionado na região da ocorrência de maiores deslocamentos, ou seja, próximo à extremidade livre da viga. O EER e a FBG ficaram posicionados na região de maior deformação específica, ou seja, próximo ao engaste.

As frequências naturais determinadas experimentalmente a partir dos ensaios de vibrações livres, em função do nível de carregamento estático ao qual a viga foi submetida, podem ser vistas na figura 4. Pode ser observado que o resultado obtido com o sensor usando FBG concorda muito bem com aqueles medidos pelos sensores convencionais.

### 4 Medidas de Temperatura

Outro método possível para a monitoração de redes de Bragg em fibras ópticas, usando o esquema aqui proposto,

é o do filtro sintonizável [1]. Nesse caso a medição é indireta. O valor real da grandeza medida (ex: temperatura) é conseguido pela relação entre a posição espectral da rede de referência e a da rede sensora. O controle do comprimento de onda de Bragg da rede de referência pode ser feito por variação térmica, fixando-a a um termo-elemento Peltier, por um atuador piezo-elétrico ou mesmo eletromecânico,

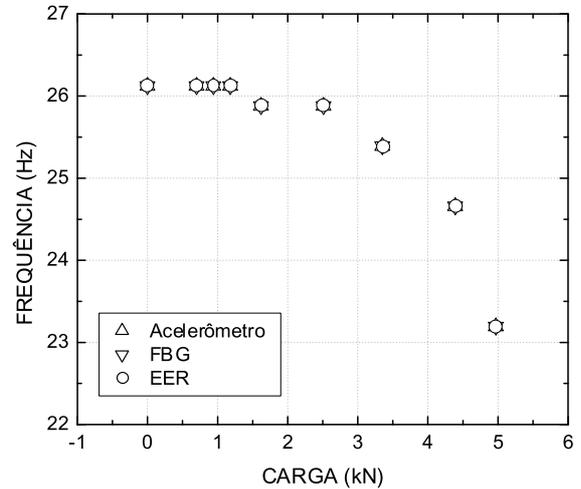


Figura 4. Frequência natural de oscilação determinada após aplicação de diferentes cargas.

controlados eletronicamente. Foi utilizado um Peltier devido à sua disponibilidade comercial, embora apresente maior tempo de resposta por causa das características térmicas. A medida é realizada fazendo com que as duas redes de Bragg mantenham seus espectros sintonizados. Para uma aplicação de interesse - medida de temperatura em um trocador de calor - preferiu-se que os espectros estivessem parcialmente superpostos, conforme indicado no desenho na figura 2, porque diminui a necessidade de pós-processamento do sinal (controle). Essa situação produz valor constante de tensão na saída do sistema e, quando a rede de Bragg sensora experimenta variação de temperatura, o sinal de tensão na saída do aparelho sofre alteração proporcional, servindo como sinal de realimentação para a malha de controle eletrônico do Peltier, que aumenta ou diminui a temperatura da rede de referência. No momento em que a posição espectral relativa inicial entre as duas redes de Bragg é novamente atingida, mede-se a temperatura do Peltier com um termômetro calibrado e a temperatura real no sensor é dada por.

$$\Delta T_{sensor} = k \times \Delta T_{Peltier} \quad (3)$$

onde  $k$  é o coeficiente de relação entre a variação de temperatura do Peltier e a variação de temperatura do sensor para que a posição espectral relativa das FBGs seja constante. Esse coeficiente depende do material do substrato em que a rede de referência é colada, determinando a faixa de operação do sistema [11] e deve ser previamente determinado.

Na figura 5 observa-se a variação do sinal de saída do sistema quando a rede sensora está sujeita a diferentes temperaturas, mantendo a rede de referência em temperatura constante. A intenção desse ensaio é demonstrar a sensibilidade do sistema para monitorar a convolução entre os dois espectros, induzida pela alteração da posição espectral devido à variação da temperatura em uma das redes.

Naquela figura está também indicada a região de operação linear do sistema para medição de temperatura, com a respectiva reta de ajuste por mínimos quadrados, com coeficiente de correlação igual a 0,9993. Essa região é a mais adequada para a implementação da malha de controle para a posição da rede de referência.

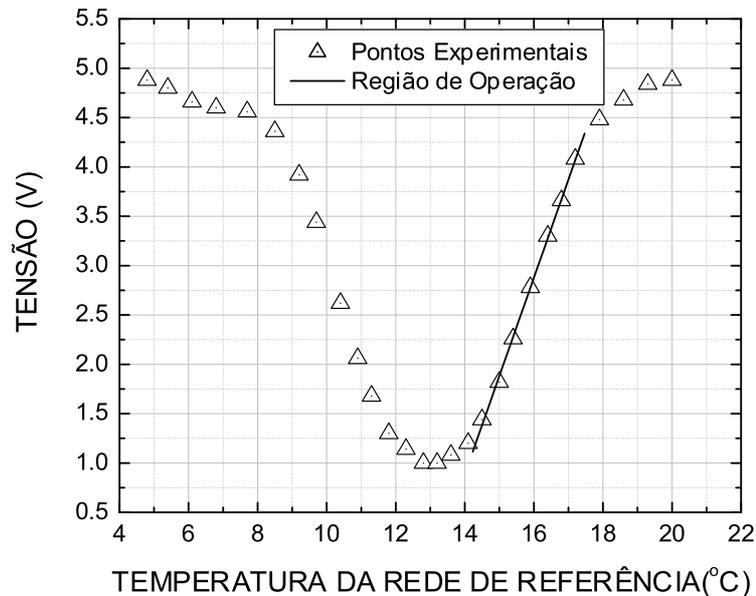


Figura 5. Resposta do sistema para diferentes temperaturas da rede sensora e ajuste linear da região de operação do sistema, com coeficiente de correlação igual a 0,9993.

## 5 Conclusão

Foi desenvolvido um sistema para leitura de redes de Bragg de custo relativamente baixo, baseado na correlação espectral entre a rede sensora e uma de referência. A flexibilidade do instrumento foi verificada através de resultados obtidos tanto na medida de vibração como na de temperatura.

Empregado na medida de vibrações, o aparelho apresentou alta fidelidade à resposta de sensores padrões, especificamente, acelerômetro e extensômetro de resistência elétrica. Foi avaliada a relação sinal ruído (SNR) de cada sensor usando a região de maior amplitude do sinal; para a FBG é de 39 e para o sensor resistivo 16 [12]. A SNR do acelerômetro não pode ser comparada à da FBG e à do EER devido ao posicionamento dos sensores na viga. O acelerômetro foi posicionado na extremidade da viga, onde a amplitude de oscilação é superior àquelas das regiões onde os outros sensores foram posicionados. Na avaliação da SNR é importante ressaltar que o EER e a FBG estavam colados lado a lado e, dessa forma, sofreram a mesma deformação.

Na medição de temperatura observou-se que o sinal na saída do sistema é proporcional à variação de temperatura

do sensor. A malha de controle do sistema foi implementada em um microcomputador usando *software* LabView e resultados preliminares demonstram alta estabilidade, tempo de resposta da ordem de 3 segundos, resolução de aproximadamente 0,1 °C e erro de 5,4%.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES, à Fundação Araucária, ao CNPq e CTPETRO pela concessão de bolsas e patrocínio do projeto, realizado parcialmente dentro do âmbito do convênio ANP/PRH-10 e agradecem, ainda, aos professores E. Penner e P. J. Abatti pela colaboração em alguns aspectos técnicos.

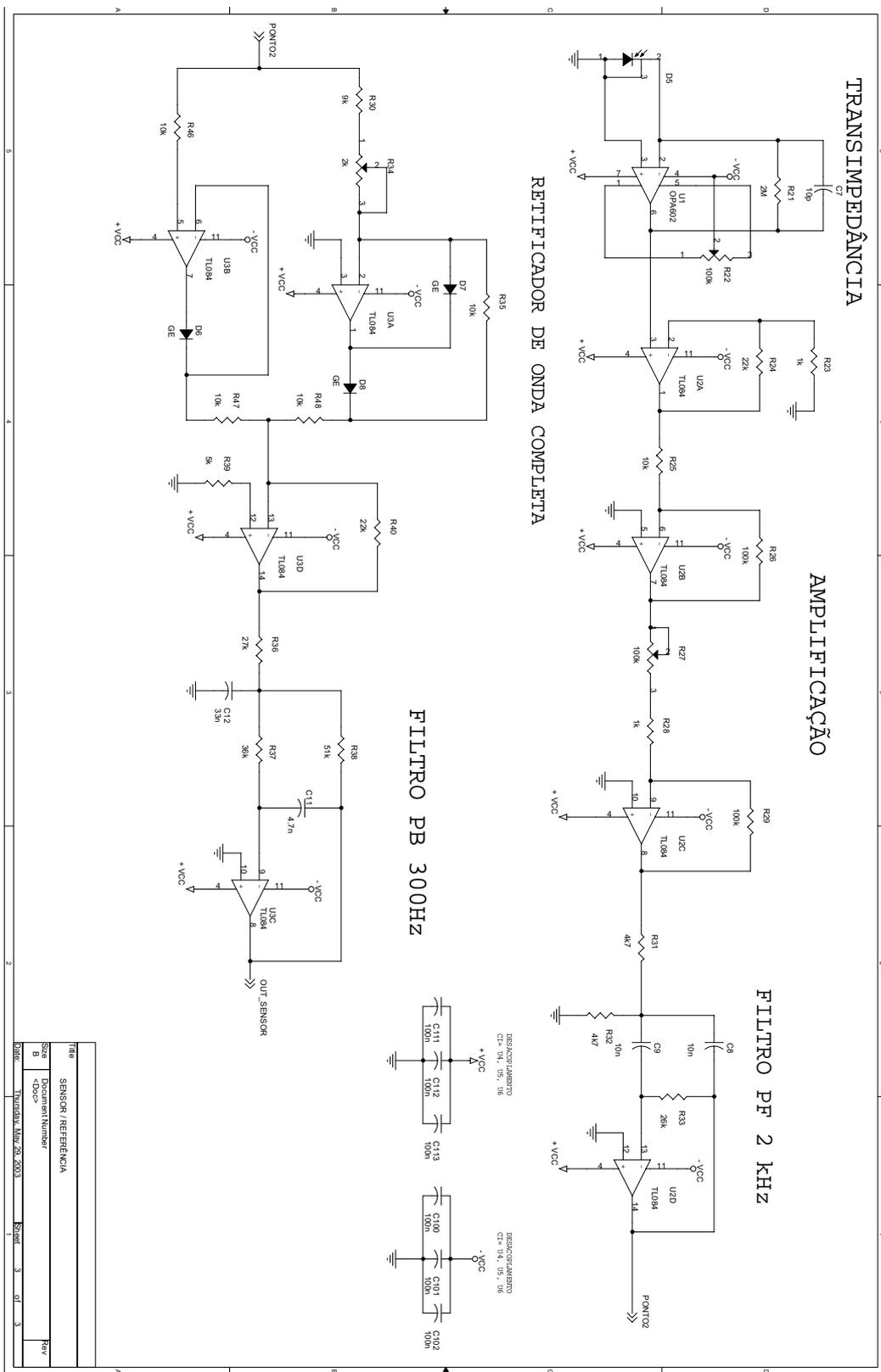
### Referências

- [1] Othonos, A., Kalli, K. *Fiber Bragg Grating*, Artech House, 1999.
- [2] Thongnum, W., Takahashi, N. Temperature Stabilization of Fiber Bragg Grating Vibration Sensor, *Proc. 15th International Conference on Optical Fiber Sensor*: 223-226, 2002.

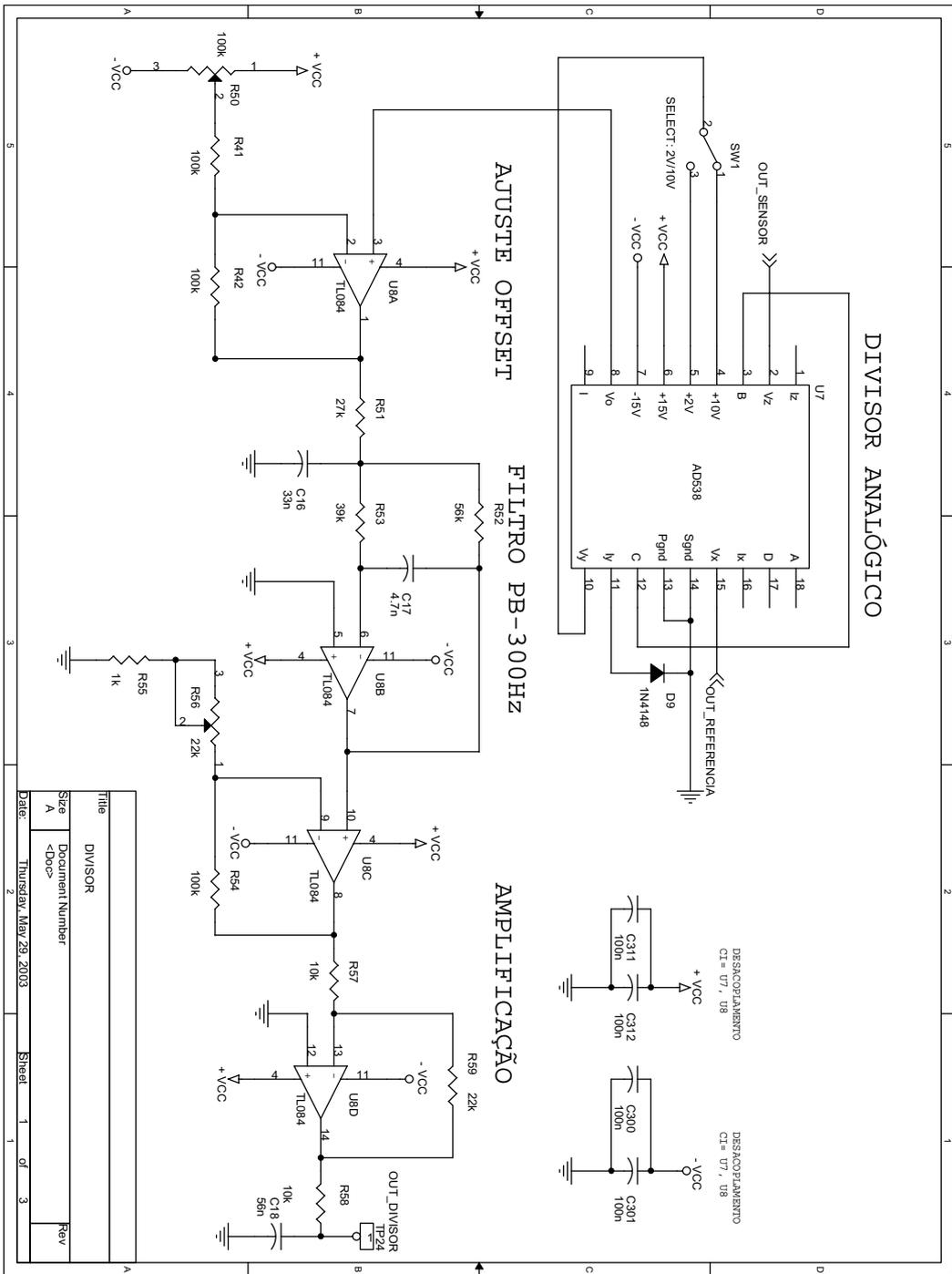
- [3] Cheng, L. K., Oostdijck, B. W. High-speed structural monitoring using a Fiber Bragg Grating sensor system. *Proc. 15th International Conference on Optical Fiber Sensor*. 215-218, 2002.
- [4] Hedi Bellil, Mustafa A.G. Abushagur. Heterodyne detection for Fiber Bragg Grating sensors. *Optics and Laser Technology*, 297 – 300, 2000.
- [5] Y.J. Rao, S.F. Yuan, X.K. Zeng, D.K. Lian, Y.Zhu, Y.P. Wang, S.L. Huang, T.Y. Liu, G.F. Fernando, L. Zhang, I. Bennion. Simultaneous strain and temperature measurement of advanced 3-D braided composite materials using an improved EFPI/FBG system. *Optics and Laser in Engineering*. 557 – 566, 2002.
- [6] Kersey, A. D., Davis, M. A., Patrick, H. J., Leblanc, M., Koo, K. P., Askins, C. G., Putnam, M. A., Friedele, E. J. Fiber Grating Sensor. *Journal of Lightwave Technology*. **15**, 1442-1463, 1997.
- [7] Zhao, Y., Liao, Y. Discrimination methods and Demodulation Techniques for Fiber Bragg Grating Sensors. *Optics and Lasers in Engineering*. In Press, 2003.
- [8] Leiderman, R., Matos, C. J. S., Braga, A. M. B., Margulis, W., Valente, L. C. G. Interrogation methods for Fiber Bragg Grating Sensor. *Optics and Lasers in Engineering*. 554-560, 1999.
- [9] H. Strub, W. Bückner, L. Cloutier, D. Hartmann, H. J. Krispin, C. Mackness, K. O. Papailiou, J. C. Poffenberger, C. B. Rawlins, B. Rhebergen, A. Roos, D. G. Havard, R. Ruritz. Guide To Vibration Measurements on Overhead Lines. *Électra*. 124-137, 1995.
- [10] Rao, S. S. *Mechanical Vibrations*. Addison - Wesley Publishing Company, 1995.
- [11] Silva, J. C. C., Martelli, C., Diesel, B. W., Fabris, J. L., Kalinowski, H. J., Goothoff, N., Canning, J. Termômetro de Alta Temperatura (0 - 400 C) baseado em Redes de Bragg em Fibra Ótica para Aplicação no Setor de Petróleo. *III Seminário Nacional de Controle e Automação*. 2003, Salvador.
- [12] Silva, J. C. C., Martelli, C., Penner, E., Kalinowski, H. J., Pinto, J. L. Medição de Vibrações com Redes de Bragg: Caracterização Instrumental Primária. *Física 2002-13a Conferência Nacional de Física - 12o Encontro Ibérico para o Ensino da Física, Portugal*. 589 - 590, 2002.

## 6 Apêndice

Os diagramas esquemáticos dos circuitos desenvolvidos são apresentados nos apêndices 1 e 2. O circuito do apêndice 1 corresponde aos ramos  $a - e$  e  $o - k$  do diagrama em blocos da Figura 3. O circuito do apêndice 2 corresponde ao ramo  $f - j$  do mesmo diagrama em blocos.



Apêndice 1



Title		DIVISOR	
Size	Document Number		
A	<Doc>		
Date:	Thursday, May 29, 2003	Sheet	1 of 3
		Rev	

Apêndice 2