



**Carla Carvalho Kato**

**Sistema de interrogação de múltiplos sensores a rede de  
Bragg utilizando reflectometria no domínio do tempo e  
filtros fixos**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial  
para obtenção do título de Mestre pelo Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da  
PUC-Rio.

Orientador: Jean Pierre von der Weid

Rio de Janeiro, novembro de 2004

**Carla Carvalho Kato**

**Sistema de interrogação de múltiplos sensores a rede de Bragg utilizando reflectometria no domínio do tempo e filtros fixos**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Jean Pierre von der Weid**

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

**Luiz Carlos Guedes Valente**

Gavea Sensors

**Mônica de Lacerda Rocha**

CPqD

**Luis Carlos Blanco Linares**

PUC-Rio

**José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 05 de novembro de 2004

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

### **Carla Carvalho Kato**

Graduou-se Bacharel em Engenharia Elétrica na PUC-Rio (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro) em 2002. Tem como áreas de interesse a óptica aplicada e sensores a fibra óptica.

#### Ficha Catalográfica

Kato, Carla Carvalho

Sistema de integração de múltiplos sensores a rede de Bragg utilizando reflectometria no domínio do tempo e filtros fixos / Carla Carvalho Kato ; orientador: Jean Pierre von der Weid. – Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2004.

97 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Redes de Bragg em fibras óticas. 3. Sensores óticos. 4. Técnica de interrogação. 5. Reflectometria no domínio do tempo. 6. Multiplexação (TDM/WDM). I. Weid, Jean Pierre von der. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

Aos meus pais

## **Agradecimentos**

Aos professores Luiz Carlos Guedes Valente e Jean Pierre von der Weid pela orientação, pelas idéias e pelo apoio.

Aos meus pais por terem me incentivado e a creditado em mim.

Ao Zé, meu namorado, pela compreensão, apoio, carinho e dedicação.

Ao pessoal do Laboratório de Sensores a Fibra Óptica, Adriana, Fellipe, Thiago, Linares, Sully, Jane, Menino Vinicius, Marcelo, Fábio, Leon e Daniel.

Ao amigo Alex Hare pelas idéias.

Aos franceses que me auxiliaram, Faouzi e Regis.

Ao pessoal do CS, Morikawa, Adriano, Bruno, Roberth e Tocha, pelos momentos de descontração e ajuda.

Ao Amigo Giancarlo e o pessoal do Laboratório de Optoeletrônica pelo empréstimo de materiais.

Ao amigo Eduardo e a Gavea Sensors pelo incentivo.

A Capes pelo apoio financeiro.

Aos meus amigos que de alguma forma me ajudaram e apoiaram nos momentos mais difíceis.

## Resumo

Carla Carvalho Kato. **Sistema de interrogação de múltiplos sensores a rede de Bragg utilizando reflectometria no domínio do tempo e filtros fixos.** Departamento de Engenharia Elétrica, 2004. xxxp. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho apresenta um sistema de interrogação de sensores a rede de Bragg em fibras ópticas, baseado em reflectometria no domínio do tempo e filtros fixos a rede de Bragg. Utilizando uma fonte de luz pulsada, a posição espectral do sensor é relacionada à razão da intensidade dos pulsos, tornando a detecção independente de variações de intensidade. São abordados aspectos teóricos e experimentais referentes aos princípios de funcionamento desta técnica. Uma vez que a filtragem é feita com redes de Bragg, apenas um circuito de fotodetecção é utilizado e um número reduzido de acopladores/circuladores ópticos é necessário, o sistema possibilita reduzir consideravelmente o custo para a interrogação de um conjunto de sensores. A utilização de apenas um circuito de fotodetecção apresenta a vantagem de manter as mesmas características para todos os pulsos, minimizando influências externas neste circuito como, por exemplo, variações da temperatura ambiente. Foi montada uma bancada de testes para a interrogação de seis sensores. Comparações entre os resultados experimentais e simulados mostram boa concordância. Extrapolações indicam que seria possível interrogar sensores com uma variação espectral de 2 nanômetros, com incertezas menores que 10 picômetros, o que é adequado para sensores de temperatura. Análises de interferência entre dois canais adjacentes mostram pouca influência entre eles e são apresentadas opções para diminuir essa interferência.

## Palavras-chave

Redes de Bragg em fibras ópticas; sensores ópticos; técnica de interrogação; reflectometria no domínio do tempo; multiplexação (TDM/WDM)

## Abstract

Kato, Carla Carvalho. **Interrogation system for multiple Bragg grating sensors using time domain reflectometry and fixed filters.** Rio de Janeiro, 2004. xxxp. Master's Thesis - Department of Electrical Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work presents a system for the interrogation of fiber-optic Bragg grating sensors based on time domain reflectometry and Bragg grating fixed filters. Using a pulsed light source, the spectral position of the sensor is related to the ratio of two pulses intensities, making detection independent of intensity variations. Theoretical and experimental aspects regarding the working principles of this technique are discussed. Since filtering is accomplished with Bragg grating so that only one photodetection circuit is used and a reduced number of optic couplers/circulators are needed, the system provides a considerable reduction in the cost of interrogation for a set of sensors. Using only one photodetection circuit also has the advantage of maintaining the same characteristics for all pulses, thus minimizing external influences in this circuit, such as variations in the environment temperature. A test stand was assembled for the interrogation of six sensors. Comparisons between experimental and simulated results show a good agreement. Extrapolations indicate that it would be possible to interrogate sensors with a spectral variation of 2 nanometers, with uncertainties lower than 10 pm, which is adequate for temperature sensors. Cross talk analyses between two adjacent channels show small influence between them, and approaches to reduce this interference are presented.

## Keywords

Fiber Bragg grating sensors; optical sensors; interrogation technique; time reflectometry; multiplexing (TDM/WDM)

# Sumário

1	Introdução	15
2	Descrição Preliminar	19
2.1.	Redes de Bragg em Fibra Óptica	19
2.1.1.	Princípio de Funcionamento das Redes de Bragg em fibra óptica como sensores	20
2.1.2.	Técnicas de interrogação de sensores a Rede de Bragg	22
3	Sistema de interrogação de múltiplos sensores a rede de Bragg utilizando reflectometria no domínio do tempo e filtros fixos	25
4	Montagem Experimental	30
4.1.	Módulo de Emissão	30
4.1.1.	Fonte de luz	31
4.1.2.	Circuito elétrico de emissão	32
4.2.	Módulo de Detecção	35
4.2.1.	Fotodetector	36
4.2.2.	Circuito elétrico de detecção	37
4.3.	Módulo de acoplamento	39
4.4.	Módulo de atraso espectral	41
4.4.1.	Redes de Bragg para Filtros	42
4.4.2.	Controle de temperatura dos filtros	44
4.5.	Conjunto de Sensores	45
4.6.	Configuração do sistema	47
5	Resultados	50
5.1.	Simulação	50
5.2.	Comparação entre resultados simulados e experimentais	54
5.3.	Incertezas Experimentais	61



6 Conclusões	83
7 Referências bibliográficas	85
Apêndice A	88
Técnicas de Multiplexação	88
Multiplexação por divisão de Tempo	88
Multiplexação por divisão de Freqüência	89
Apêndice B	91
Incerteza	91
Calibração	93
Estimativas de incerteza dos canais 1 e 2	94
Anexo	96

## Lista de figuras

Figura 2.1 Rede de Bragg e os espectros de transmissão e reflexão	21
Figura 2.2 Circuito óptico utilizando Analisador de Espectro Óptico (a) e Medidor de comprimento de onda (b).	22
Figura 2.3 Sistema de sensoriamento com 1 e 2 pontos de medição, (a) e (b), utilizando Redes de Bragg como sensor e filtro [22]	23
Figura 3.1 Diagrama de blocos do sistema	25
Figura 3.2 Percurso do pulso pelo circuito óptico	26
Figura 3.3 Duas situações, (a) e (b), de variação espectral de um sensor	27
Figura 3.4 Pulsos luminosos detectados, relacionados às reflexões mostradas nas figuras 3.3a e 3.3b	28
Figura 3.5 Exemplo de curva de calibração da variação do comprimento de onda do sensor em função da razão de intensidades medida pelo Fotodetector	29
Figura 4.1 Diagrama de blocos do circuito emissor	33
Figura 4.2 Esquemático do circuito elétrico de fotoemissão	33
Figura 4.3 Pulso óptico detectado por um fotodetector amplificado com resposta rápida	34
Figura 4.4 Espectro do SLED pulsado a 100kHz com um pulso de 25ns de largura	35
Figura 4.5 Esquemático do circuito de fotodeteção	37
Figura 4.6 Curva de linearidade do circuito de detecção	38
Figura 4.7 Pulso óptico detectado pelo módulo de detecção	38
Figura 4.8 Módulos de acoplamento: (a) acoplador com chave óptica; (b) dois acopladores de três portas; (c) conjugação de um circulador de três portas e um acoplador de três portas; (d) um circulador de quatro portas.	40
Figura 4.9 Módulo de atraso espectral	42
Figura 4.10 Espectro das redes de filtro refletidas.	43
Figura 4.11 Perdas e refletividade dos filtros normalizados em relação a fonte.	43
Figura 4.12 Pulsos refletidos pelas redes de filtros vistas no módulo de fotodeteção	44

Figura 4.13 Estabilidade dos filtros	45
Figura 4.14 Espectro dos sensores a rede de Bragg	46
Figura 4.15 Peça de deformação dos sensores	47
Figura 4.16 Configuração final do sistema	48
Figura 4.17 Pulsos referentes aos seis sensores detectados e amplificados vistos no osciloscópio	49
Figura 5.1 Resultados numéricos relativos às intensidades máximas dos pulsos detectados, $V_1$ , para o primeiro filtro, e $V_2$ , para o segundo filtro, em função da posição de pico do sensor para o canal 1.	51
Figura 5.2 Resultado numérico para a função $f$ versus a posição de pico do sensor obtido a partir dos dados da figura 5.1.	52
Figura 5.3 Incerteza teórica para o canal 1	53
Figura 5.4 Resultados numéricos e experimental para a função $f$ versus a posição espectral do sensor 1.	55
Figura 5.5 Incerteza, teórica e experimental, associada à posição do sensor, para o canal 1	56
Figura 5.6 Reprodutibilidade (distância entre os pontos quadrados e a média dos pontos triangulares) e repetitividade (pontos triangulares), da medida do canal 1	57
Figura 5.7 Resultados numéricos e experimental para a função $f$ versus a posição espectral do sensor 2.	58
Figura 5.8 Resultados numéricos e experimental para a função $f$ versus a posição espectral do sensor 4.	58
Figura 5.9 Resultados numéricos e experimental para a função $f$ versus a posição espectral do sensor 5.	59
Figura 5.10 Resultados numéricos e experimental para a função $f$ versus a posição espectral do sensor 6.	59
Figura 5.11 Espectro de deformação do sensor 3.	60
Figura 5.12 Incerteza, teórica e experimental, associada à posição do sensor, para o canal 2.	60
Figura 5.13 Resposta do sistema com variação da potência óptica.	62
Figura 5.14 Efeito de interferência no sensor 2 pelo sensor 1	63
Figura 5.15 Detalhe da deformação do canal 1, (a), e do canal 2, (b), para a	

figura 5.14	64
Figura 5.16 Efeito de interferência no sensor 1 pelo sensor 2	65
Figura 5.17 Detalhe da deformação do canal 1, (a), e do canal 2, (b), para a figura 5.16	66
Figura 5.18 Variação da posição espectral dos sensores 1 e 2 devido à temperatura.	67
Figura 5.19 Resposta do sistema para dois ganhos elétricos do circuito de detecção, (a) e (b), média de 256 medidas.	68
Figura 5.20 Resposta do sistema para ganho elétricos do circuito de detecção de 500 e média de 1024 medidas.	70
Figura 5.21 Razão entre as intensidades versus variação da posição espectral do sensor 1 para a situação da figura 5.20.	70
Figura 5.22 Configuração para caracterizar a dependência do sistema com os estados de polarização, situação 1	72
Figura 5.23 Histograma das intensidades normalizadas dos pulsos refletidos pelos filtros ao variar os estados de polarização da fonte, onde $F_{nm}$ equivale ao filtro $m$ do canal $n$ .	72
Figura 5.24 Histograma da razão normalizada, $R_n = F_{n1}/F_{n2}$ , das intensidades de pico dos filtros para a situação da figura 5.22.	73
Figura 5.25 Variação das intensidades refletidas pelos filtros, para a situação da figura 5.22, dos canais 1 (a) e 6 (b).	75
Figura 5.26 Configuração com despolarizador de Lyot para caracterizar a dependência do sistema com os estados de polarização.	76
Figura 5.27 Histograma das intensidades normalizadas dos pulsos refletidos pelos filtros ao variar os estados de polarização da fonte com o despolarizador de Lyot, onde $F_{nm}$ equivale ao filtro $m$ do canal $n$ .	76
Figura 5.28 Histograma da razão normalizada, $R_n = F_{n1}/F_{n2}$ , das intensidades de pico dos filtros para a situação da figura 5.26.	77
Figura 5.29 Detalhe da variação das intensidades refletidas pelos filtros dos canais 1 (a) e 6 (b) com o despolarizador de Lyot.	79
Figura 5.30 Configurações do sistema, sem (a) e com (b) despolarizador de Lyot.	80
Figura 5.31 Variação das intensidades referentes ao canal 1, sem (a) e com (b)	

despolarizador de Lyot.	81
Figura 5.32 Comparação entre as razões encontradas para o canal 1 em duas situações, sem e com o despolarizador de Lyot.	81
Figura A.1 - Multiplexação por divisão do tempo	89
Figura A.2 Multiplexação por divisão de Frequência	90
Figura A.3 Multiplexação por divisão Comprimento de Onda	90

## Lista de tabelas

Tabela 4.1- Características da Fonte de luz	32
Tabela 4.2 Características do fotodiodo utilizado.	36
Tabela 4.3 Características dos componentes de acoplamento	41
Tabela 5.1 Estatísticas para ganhos diferentes	69
Tabela 5.2 Média e desvio padrão referentes aos gráficos das figuras 5.26 e 5.27.	73
Tabela 5.3 Média e desvio padrão referentes aos gráficos das figuras 5.27 e 5.28.	77
Tabela 5.4 Média e desvio padrão referentes aos gráficos das figuras 5.31 e 5.32.	82
Tabela B.1 Valores estimados para incerteza do canal 1	95
Tabela B.2 Valores estimados para incerteza do canal 2	95