Sully Milena Mejia Quintero

**Desenvolvimento de um sensor de campo
magnético baseado em fibras ópticas para a
monitoração em hidrogeradores**

Tese de Doutorado

Tese apresentada como ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Arthur Martins Barbosa Braga

Rio de Janeiro
Setembro de 2010

Sully Milena Mejia Quintero

Desenvolvimento de um sensor de campo magnético baseado em fibras ópticas para a monitoração em hidrogeradores

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Arthur Martins Barbosa Braga

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Hans Ingo Weber

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Antonio Carlos Oliveira Bruno

Departamento de Física – PUC-Rio

Prof. Cícero Martelli

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Hypolito Jose Kalinowski

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Luiz Carlos Guedes Valente

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Luiz Carlos da Silva Nunes

Universidade Federal Fluminense

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 27 de setembro de 2010

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

Sully Milena Mejia Quintero

É Bacharel em Física pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (2004), obteve o Mestrado em Engenharia Mecânica em 2006 e o Doutorado em Engenharia Mecânica em 2010, ambos pela PUC-Rio. Atualmente é pesquisadora no Laboratório de Sensores a Fibra Óptica da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Ficha Catalográfica

Mejia Quintero , Sully Milena

Desenvolvimento de um sensor de campo magnético baseado em fibras ópticas para a monitoração em hidrogeradores / Sully Milena Mejia Quintero; orientador: Arthur Martins Barbosa Braga. – 2010.

88 f. ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2010.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Sensor de campo magnético. 3. Redes de bragg em fibras ópticas. 4. Fibras ópticas microestruturadas, 5. Monitoramento de hidrogeradores. I. Braga, Arthur Martins Barbosa. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

A mi querida madre Blanca Nelly Quintero Martinez.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que direta e indiretamente colaboraram na realização deste trabalho, oferecendo tanto seu apoio acadêmico como pessoal.

Ao professor Arthur Braga por toda a orientação e respeito, por acreditar no meu trabalho e me incentivar sempre.

Aos professores Hans Ingo Weber, Antonio Carlos Bruno e Cicero Martelli por compartilharem suas valiosas idéias.

Ao Luiz Carlos Guedes, pelas idéias e discussões que me ajudaram a resolver muitas dúvidas.

Meus mais sinceros agradecimentos a todos os colegas e amigos do LSFO, que sempre estiveram por perto, concederam de seu valioso tempo para me ensinar e ajudar, em especial à Carla Kato.

Aos Departamento de Física e Departamento de Metalurgia pela ajuda, em especial ao Jefferson Ferraz.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Mecânica que contribuíram no meu crescimento acadêmico, em especial ao Wagner Epifânio da Cruz por toda a ajuda.

À PUC-Rio, que me aceitou como sua aluna.

Agradeço à Gladys, ao Cremona e minha família.

Resumo

Quintero, Sully Milena Mejia; Braga, Arthur Martins Barbosa (Orientador). **Desenvolvimento de um sensor de campo magnético baseado em fibras ópticas para a monitoração em hidrogeradores.** Rio de Janeiro, 2010. 88p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta tese trata do desenvolvimento de sensores para a monitoração do fluxo de campo magnético utilizando fibras ópticas. A principal motivação reside no uso destes sensores no control da condição de hidrogeradores. Duas tecnologias de sensoramento com fibras ópticas são exploradas. A primeira baseia-se no uso de redes de Bragg e a segunda no emprego de interferômetros modais em fibras ópticas microestruturadas que apresentam alta birefringência. Em ambos os casos as fibras são recobertas por uma camada de material compósito magnetostrictivo, que responde ao campo magnético deformando-se. Esta deformação é transferida para a rede de Bragg ou para a fibra microestruturada, produzindo uma resposta dependente do campo magnético. Os sensores desenvolvidos são leves e compactos. O sensor baseado em redes de Bragg, de formato cilíndrico com 1,5 mm de diâmetro e 7 mm de comprimento, passou por testes estáticos em campos magnéticos de até 750 mT tendo apresentado uma resolução de 0,3 mT. Testes dinâmicos foram realizados em um rotor de bancada desbalanceado e os resultados obtidos comparados com os fornecidos por um sensor magnético de efeito Hall mostrando excelente concordância. O sensor a fibra óptica interferométrico foi caracterizado estaticamente, tendo apresentado uma sensibilidade ao campo magnético duas vezes superior à do sensor baseado em redes de Bragg.

Palavras-chave

Sensor de Campo Magnético, Redes de Bragg em Fibras Ópticas, Fibras Ópticas Microestruturadas, Monitoramento de Hidrogeradores

Abstract

Quintero, Sully Milena Mejia; Braga, Arthur Martins Barbosa (Advisor). **Optical fiber magnetic field sensor for hydro generators**. Rio de Janeiro, 2010. 88p. PhD – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work explores the use of optical fiber sensors for the measurement of magnetic fields. In focus are applications in the condition monitoring of hydro-generators, in particular for the measurement of the air gap, which consists in the space between rotor and stator of the synchronous machine. Two different fiber optic sensing principles were employed to develop magnetic field sensors. The first was based on fiber Bragg gratings and the second on an in-fiber modal interferometer, where the two orthogonally polarized modes of a high birefringent microstructured fiber generate fringes over the optical spectrum of a broad band source. In both cases, the fibers are coated by a thick layer of a magnetostrictive composite that deforms due to changes in its magnetization state. Strains in the coating are transferred to the fiber and measured by the sensor. The developed sensors are light and compact. The Bragg grating magnetic field sensor is cylindrical in shape with diameter of 1.5 mm and 7 mm long. The sensor was tested at magnetic fields of up to 750 mT under static conditions. The resolution achieved with a commercial interrogator was estimated at 0.4 mT. Dynamic tests were carried out in a laboratory rotor that presented a magnetic unbalance of approximately 7% in one of its four poles. Results were compared with a Hall Effect sensor showing excellent agreement. The interferometric sensor was characterized and results of static tests demonstrated that its sensibility to changes in the magnetic field is twice that of the sensor based on Bragg gratings.

Keywords

Magnetic Field Sensor, Photonic Crystal Fibers, Fiber Bragg Gratings, Monitoring Systems for Hydro Generator.

Sumário

1. Introdução	14
2. Conceitos Básicos	18
2.1. Fibras Ópticas	18
2.2. Fibras ópticas especiais “Fibras ópticas microestruturadas”	20
2.2.1. Classificação	22
2.2.2. Propriedades ópticas	22
2.3. Sensores à Fibra Óptica	23
2.3.1. Sensores à fibra Óptica Baseados em Redes de Bragg	25
2.3.2. Sensor interferométrico modal baseado numa fibra óptica de alta birrefringência	27
2.4. Materiais Magnetostritivos	29
2.4.1. Magnetismo	31
2.4.2. Magnetização	32
2.4.3. Relação entre $\mathbf{B}$, $\mathbf{H}$ e $\mathbf{M}$	33
3. Compósito Magnetostritivo	35
3.1. Preparação das Amostras do Compósito	36
3.2. Caracterização Magnética do Compósito Magnetostritivo	37
3.2.1. Análise Microscópica	37
3.2.2. Análise Magnética	39
4. Sensor de campo magnético baseado em redes de Bragg	42
4.1. Projeto do sensor de campo magnético baseado em redes de Bragg	42
4.1.1. Princípio de Funcionamento	44
4.1.2. Ensaio de Calibração: “Magnetostrrição versus campo magnético aplicado”	44
4.1.3. Ensaio estático	45
4.1.3.1. Montagem experimental	45
4.1.3.2. Resultados "Sensibilidade do sensor"	45
4.1.3.3. Resultados "Dependência no tamanho da partícula e da concentração de Terfenol-D, na magnetostrrição do sensor"	46
4.1.3.4. Resultados "Magnetostrrição em função da pre-tensão e o ângulo entre o eixo axial do sensor e campo magnético"	48
4.1.4. Ensaio dinâmico	49
4.1.4.1. Montagem experimental	50
4.1.4.2. Resultados "Distribuição angular de campo magnético e perfil geométrico do rotor"	50
4.1.4.3. Resultados: “Excentricidade”	52
4.1.5. Ensaio de Calibração: “Temperatura”	53
5. Sensor de campo magnético baseado numa fibra óptica microestruturada	57
5.1. Caracterização da fibra microestruturada PM-1550	57
5.1.1. Montagem experimental	59
5.1.2. Determinação da birrefringência modal de fase e de grupo	59

5.1.3. Ensaio de tração	63
5.1.4. Projeto do sensor de campo magnético baseado na fibra PM-1550	64
5.1.5. Resultados "Sensibilidade do sensor"	65
5.1.6. Comparação das sensibilidades dos protótipos baseados em PM-1550 e FBG em função do campo magnético aplicado.	67
6. Análise da fibra microestruturada PM-1550 como sensor de pressão	69
6.1. Avaliação numérica da fibra PM-1550	69
6.1.1. Modelo Geométrico	71
6.1.2. Análise Estrutural	72
6.1.3. Análise Eletromagnética	74
6.1.3.1. Birrefringência modal de fase em função da pressão hidrostática	74
6.1.3.2. Sensibilidade da birrefringência em função da pressão hidrostática	76
6.2. Comparação entre os resultados teóricos e experimentais	77
Conclusão	79
Trabalhos futuros	82
Contribuições	83
Referências bibliográficas	85

Lista de figuras

Figura 1. Propagação da luz por reflexão interna total em uma fibra óptica convencional.	19
Figura 2. Propagação da luz por (a) reflexão interna total em fibra microestruturada de núcleo sólido (b) <i>Bandgap</i> Fotonico em fibra microestruturada de núcleo oco, $n_1 = 1,45$ (sílica) e $n_1 = 0$ (ar) .	22
Figura 3. Representação esquemática da rede de Bragg e das respostas espectrais de transmissão e de reflexão.	26
Figura 4. Representação esquemática da magnetostricção.	30
Figura 5. Curvas e representação esquemáticas da magnetostricção em função do campo magnético aplicado, com e sem compressão.	31
Figura 6. Fotografias das amostras correspondentes às classes I e III, embutidas numa resina epóxi fria.	38
Figura 7. Seção transversal das amostras com partículas: (a) Classe I; e (b) Classe III.	38
Figura 8. Curva de magnetização versus campo magnético aplicado ($M \times H$), para amostras referentes aos grupos A e B.	39
Figura 9. Curva magnetização versus campo magnético aplicado ($M \times H$), para os três grupos (I; II e III), com uma percentagem de 20% de volume de Terfenol-D.	40
Figura 10. Curva magnetização versus campo magnético aplicado ($M \times H$), para o grupo III, com percentagem em volume de Terfenol-D entre 10% e 30%.	40
Figura 11. Esquema do sensor magnetostriitivo.	44
Figura 12. a) Fotografia da montagem para testes estáticos utilizada na calibração do sensor. b) Curva característica de magnetostricção, versus campo magnético aplicado do compósito ($M \times H$).	46
Figura 13. Curva magnetostricção versus campo magnético aplicado ($M \times H$), (a) para as classes (II e III), com uma percentagem de 30% de volume de Terfenol-D. (b) para a classe III, com percentagem em volume de Terfenol-D entre 13% e 26%.	47
Figura 14. Curvas de magnetostricção versus campo aplicado, em função da (a) pré-carga; e (b) a inclinação do sensor em relação à direção do campo magnético.	49

Figura 15. Fotografia da montagem para testes dinâmicos (no inset rotor com ímãs).	50
Figura 16. (a) Distribuição angular do campo magnético e o perfil geométrico (a) sensor Hall e sensor de posição. (b) Esquemático do rotor e posicionamento dos sensores.	51
Figura 17. (a) Distribuição angular do campo magnético e o perfil geométrico (a) sensor Hall e sensor de posição. (b) Esquemático do rotor e posicionamento dos sensores.	53
Figura 18. Variação do comprimento de onda das duas FBGs do sensor ao longo do ciclo térmico.	54
Figura 19. Relação entre as deformações medidas pelo sensor revestido com a resina RE no eixo y e no eixo x pelo sensor sem recobrimento, (a) a 20°C e (b) a 40°C.	55
Figura 20. Fotografia em microscópio eletrônico e parâmetros da seção transversal da fibra PM-1550.	58
Figura 21. Montagem experimental do interferômetro polarimétrico.	59
Figura 22. Espectro refletido, no detalhe o deslocamento de um dos mínimos.	60
Figura 23. Comprimento de onda correspondente a um mínimo em função do comprimento de fibra, no detalhe imagem da fibra microestruturada.	60
Figura 24. Variação do espaçamento entre dos mínimos adjacentes em função do comprimento da fibra óptica microestruturada.	61
Figura 25. Birrefringência modal de fase em função do comprimento de onda.	61
Figura 26. (a) Montagem experimental para ensaio de tração; (b) Deslocamento dos picos divididos pelos respectivos comprimentos de onda para a FBG e MF.	64
Figura 27. Esquema do sensor de campo magnético baseado em fibra MF; a) Fotografia do sensor. No detalhe, a imagem da emenda entre as fibras b) SMF e MF; c) MF e capilar (FC); e d) fibra óptica capilar colapsada.	65
Figura 28. a) Montagem experimental para testes estáticos; b) Espectro refletido da fibra PM-1550, no detalhe o mínimo monitorado.	66
Figura 29. Espectro refletido da fibra PM-1550 em função do campo magnético.	66

Figura 30. Deslocamento do comprimento de onda do mínimo em função do campo magnético.	67
Figura 31. Deslocamento do espectro refletido pela PM-1550 em função do campo magnético.	68
Figura 32. Esquema utilizado para a análise do cálculo dos índices efetivos, utilizando <i>Comsol</i> [®] .	70
Figura 33. (a) Micro imagem da fibra PCF PM-1550, utilizada como referência para a modelagem numérica (b) representação esquemática do núcleo da fibra indicando os eixos principais.	71
Figura 34. Desenho esquemático das variações geométricas analisadas a) Grupo A; b) Grupo B.	72
Figura 35. (a) malha da fibra PCF PM-1550, no detalhe um zoom da malha próximo ao núcleo.	72
Figura 36. Diferença entre os índices de refração, $n_1 - n_2$, a longo do eixo 1 e 2 para uma pressão hidrostática de 34,4 MP. a) Grupo A; b) Grupo B.	73
Figura 37. Distribuição de campo elétrico para os dois modos ortogonalmente polarizados LP_{01}^1 e LP_{01}^2 .	74
Figura 38. Birrefringência modal de fase em função da pressão hidrostática entre 0 e 34,4 Mpa; a) Grupo A; b) Grupo B.	75
Figura 39. Sensibilidade da birrefringência modal de fase em função da pressão hidrostática; a) Grupo A; b) Grupo B.	77
Figura 40. Variação de birrefringência modal de fase em função da pressão hidrostática: Experimental (quadros em pretos), Simulado $D=4,5 \mu\text{m}$ (linha tracejada em preto) e simulado $D=4,1 \mu\text{m}$ (linha tracejada em vermelho). No detalhe a imagem da PM-1550.	78

Lista de tabelas

Tabela 1. Valores aproximados das propriedades do Terfenol-D e do Ferro.	29
Tabela 2. Classificação dos grupos estudados em função do tamanho das partículas.	37
Tabela 3. Grupos de amostras para a caracterização magnética.	37
Tabela 4. Comparação entre as características dos diferentes sensores investigados neste tese.	80