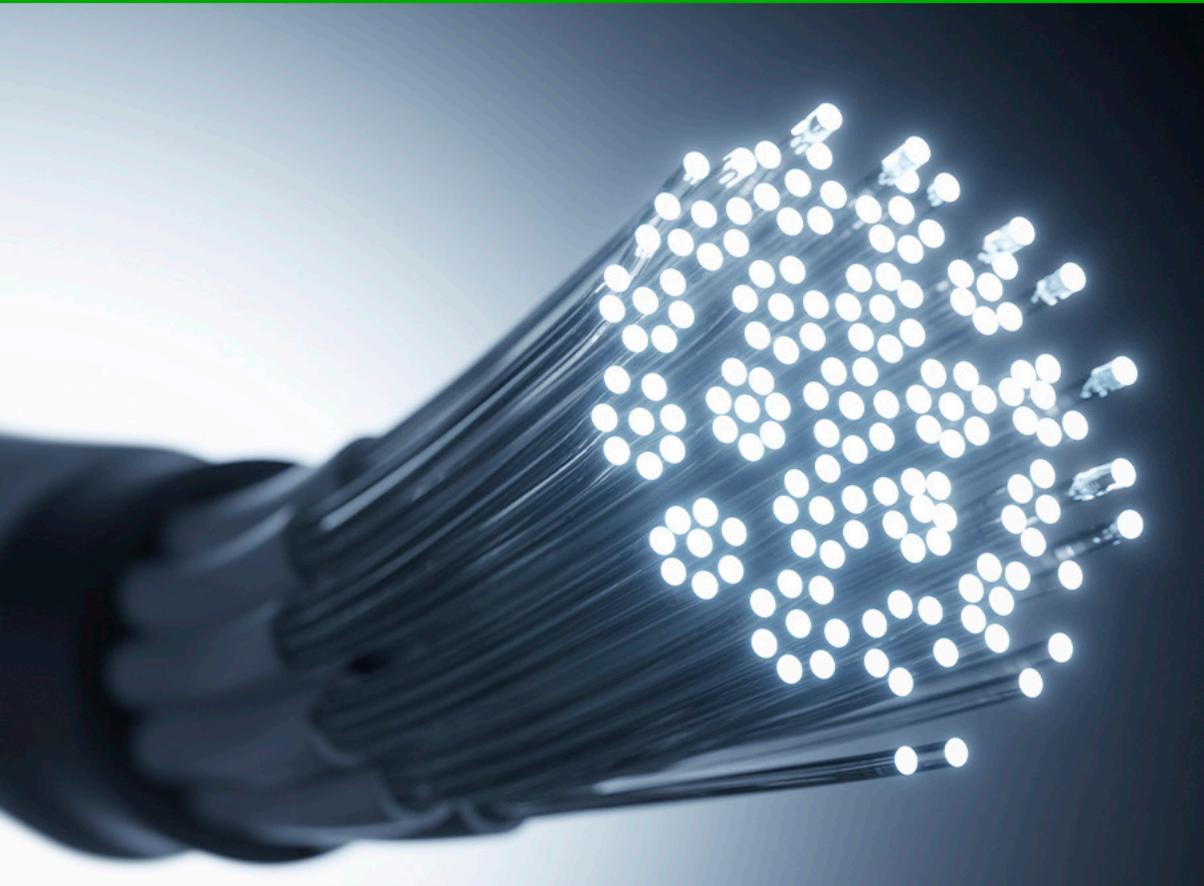


COLEÇÃO

DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

ENGENHARIA ELÉTRICA 2

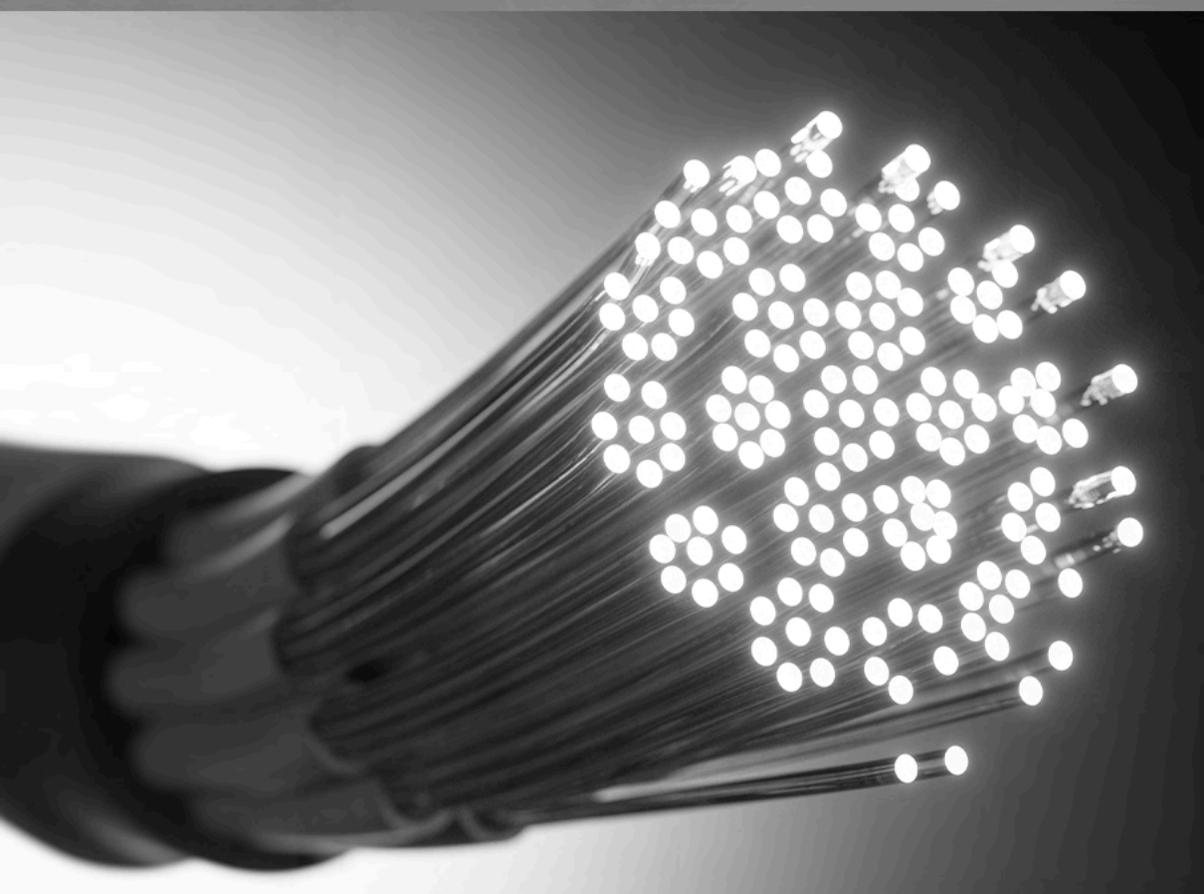


JOÃO DALLAMUTA
HENRIQUE AJUZ HOLZMANN
(ORGANIZADORES)


Ano 2021

COLEÇÃO
DESAFIOS
DAS
ENGENHARIAS:

ENGENHARIA ELÉTRICA 2



JOÃO DALLAMUTA
HENRIQUE AJUZ HOLZMANN
(ORGANIZADORES)


Atena
Editora
Ano 2021

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

Natália Sandrini de Azevedo

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2021 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2021 Os autores

Copyright da edição © 2021 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná

Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Diagramação: Daphynny Pamplona
Correção: Flávia Roberta Barão
Indexação: Gabriel Motomu Teshima
Revisão: Os autores
Organizadores: João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C691 Coleção desafios das engenharias: engenharia elétrica 2 /
Organizadores João Dallamuta, Henrique Ajuz
Holzmann. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2021.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5983-556-0

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.560211910>

1. Engenharia elétrica. I. Dallamuta, João
(Organizador). II. Holzmann, Henrique Ajuz (Organizador). III.
Título.

CDD 621.3

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, desta forma não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.

APRESENTAÇÃO

A engenharia elétrica tornou-se uma profissão há cerca de 130 anos, com o início da distribuição de eletricidade em caráter comercial e com a difusão acelerada do telégrafo em escala global no final do século XIX.

Na primeira metade do século XX a difusão da telefonia e da radiodifusão além do crescimento vigoroso dos sistemas elétricos de produção, transmissão e distribuição de eletricidade, deu os contornos definitivos para a carreira de engenheiro eletricista que na segunda metade do século, com a difusão dos semicondutores e da computação gerou variações de ênfase de formação como engenheiros eletrônicos, de telecomunicações, de controle e automação ou de computação.

Produzir conhecimento em engenharia elétrica é portando pesquisar em uma gama enorme de áreas, subáreas e abordagens de uma engenharia que é onipresente em praticamente todos os campos da ciência e tecnologia.

Neste livro temos uma diversidade de temas, níveis de profundidade e abordagens de pesquisa, envolvendo aspectos técnicos e científicos. Aos autores e editores, agradecemos pela confiança e espírito de parceria.

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

PHOTODETECTOR OPTIC POWER OPTIMIZATION TO INCREASE THE GAIN ON SUB-OCTAVE MICROWAVE PHOTONIC LINK

Naiara Tieme Mippo
Paulo Henrique Kiohara Acyoli Bastos
Felipe Streitenberger Ivo
Olympio Lucchini Coutinho

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5602119101>

CAPÍTULO 2..... 14

OPTOELECTRONIC SENSOR APPLIED TO FLOW RATE MEASUREMENTS ON OIL AND GAS INDUSTRY

Alexandre Silva Allil
Fabio da Silva Dutra
Cesar Cosenza de Carvalho
Regina Célia da Silva Barros Allil
Marcelo Martins Werneck

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5602119102>

CAPÍTULO 3..... 25

ANÁLISE DO ENVELHECIMENTO, PRECISÃO E EXATIDÃO EM SENSORES ÓTICOS FBG E RFBG QUE MEDEM TEMPERATURAS ENTRE 5 °C E 60 °C POR 16 SEMANAS

Karoline Akemi Sato
Camila Carvalho de Moura
Antonio Carlos Ribeiro Filho
Luis Camilo Jussiani Moreira
Valmir de Oliveira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5602119103>

CAPÍTULO 4..... 38

EVALUACIÓN PARA INVERSIÓN CON OPTIMIZACIÓN DE SECCIÓN CONDUCTOR Y TENSIÓN DE DISTRIBUCIÓN. APLICACIÓN DE LOS ALGORITMOS DEL LEY DE KELVIN

Christian Arturo Ramirez Osorio
Enrique Buzarquis
Rodney Damián Fariña Martínez

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5602119104>

CAPÍTULO 5..... 55

STRATEGIES OF VOLTAGE CONTROL BASED IN FUZZY LOGIC ALGORITHMS WITH ALTERNATIVE, CLEAN AND RENEWABLE GENERATION OPERATING WITH ANOTHER CONVENTIONAL ELECTRIC GENERATION IN WITH RADIAL LOADS IN POWER SYSTEMS STABILITY

Rodney Damián Fariña Martínez
Antonio Carlos Zambroni de Souza
Eliane Valença Nascimento de Lorenci

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5602119105>

CAPÍTULO 6..... 72

ESTUDOS DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS E ELETROMECAÑICOS” DA ENERGIZAÇÃO DA LT 500KV AYOLAS-VILLA HAYES SEM REATOR DESDE A CENTRAL HIDRELÉTRICA ITAIPÚ

Elisandro Rodriguez Buzarquis
Rodney Damián Fariña Martínez
Antônio Carlos Zambroni de Souza

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5602119106>

CAPÍTULO 7..... 86

TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO POR MEIO DE ACOPLAMENTO MAGNÉTICO RESSONANTE COM METAMATERIAIS CONVENCIONAIS E SUPERCONDUTORES

Arthur Henrique de Lima Ferreira
Lucas Douglas Ribeiro
Rose Mary de Souza Batalha

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5602119107>

CAPÍTULO 8..... 96

DEGRADAÇÃO POR POTENCIAL INDUZIDO (PID): REVISÃO

Hellen Ferreira Barreto Miranda
Luan Peixoto da Costa
Stefhany Oliveira Soares
Jonathan Velasco da Silva

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5602119108>

CAPÍTULO 9..... 108

CAPACITOR BANK ALLOCATION IN DISTRIBUTION SYSTEMS USING THE DISCRETE PSO ALGORITHM

Luís Henrique Chouay Dall’ Agnese
Carlos Roberto Mendonça da Rocha

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5602119109>

CAPÍTULO 10..... 119

DESIGN OF A TRANSMISSION-LINE METAMATERIAL WITH A NEGATIVE INDEX OF REFRACTION AT S-BAND

Lucas Douglas Ribeiro
Juscelino Júnior de Oliveira
Arthur Henrique de Lima Ferreira
Rose Mary de Souza Batalha

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.56021191010>

CAPÍTULO 11..... 129

RADIO PROPAGAÇÃO E MODELAGEM PARA UMA PONTE SOBRE O RIO TOCANTINS

PARA LTE

Alaim de Jesus Leão Costa
Thiago Eleuterio da Silva
Diego Kasuo Nakata da Silva
Leslye Estefania Castro Eras

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.56021191011>

CAPÍTULO 12..... 141

TESTES DE IMUNIDADE CONTRA SURTOS ELÉTRICOS EM ELETRODOMÉSTICOS

Gustavo Oliveira Cavalcanti
Marcílio André Félix Feitosa
Kayro Félyx Henrique Pereira
Manoel Henrique da Nóbrega Marinho
Antonio Samuel Neto
Lucas de Carvalho Sobral
Pollyana Maria Ramos Gonçalves
Douglas Thiago Moreira Lara
Thiago Francisco Gomes
Renato Jardim Teixeira
Wagner Almeida Barbosa

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.56021191012>

CAPÍTULO 13..... 152

AUTOMAÇÃO DA ILUMINAÇÃO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES - O SISTEMA DE CONTROLE DE ILUMINAÇÃO DALI: UM ESTUDO DE CASO

Marcos Noboru Kurata
Ênio Carlos Segatto

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.56021191013>

CAPÍTULO 14..... 163

INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS E CONSTRUTIVAS NO EIXO DO ROTOR EÓLICO

Leonardo Pavan
Evandro André Konopatzki
Cristiane Lionço de Oliveira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.56021191014>

CAPÍTULO 15..... 172

VIABILIDADE DO SISTEMA FOTOVOLTAICO NA REGIÃO DO RECÔNCAVO DA BAHIA

Gabriel Garcia Bastos de Almeida
Luanna Valéria Sousa Fonseca
Andréa Jaqueira da Silva Borges

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.56021191015>

SOBRE OS ORGANIZADORES 183

ÍNDICE REMISSIVO..... 184

CAPÍTULO 3

ANÁLISE DO ENVELHECIMENTO, PRECISÃO E EXATIDÃO EM SENSORES ÓTICOS FBG E RFBG QUE MEDEM TEMPERATURAS ENTRE 5 °C E 60 °C POR 16 SEMANAS

Data de aceite: 01/10/2021

Data de submissão: 05/08/2021

Karoline Akemi Sato

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Curitiba, Paraná, Brasil
<https://orcid.org/0000-0002-8328-3426>

Camila Carvalho de Moura

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Curitiba, Paraná, Brasil
<https://orcid.org/0000-0003-0073-0073>

Antonio Carlos Ribeiro Filho

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Curitiba, Paraná, Brasil
<https://orcid.org/0000-0002-2205-5745>

Luis Camilo Jussiani Moreira

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Curitiba, Paraná, Brasil
<https://orcid.org/0000-0001-9497-7821>

Valmir de Oliveira

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Curitiba, Paraná, Brasil
<https://orcid.org/0000-0001-5731-6127>

RESUMO: Foram produzidos, caracterizados e mantidos em operação dois sensores óticos, consistindo de um sensor FBG (rede de Bragg em fibra ótica) e de um sensor RFBG (rede de Bragg regenerada em fibra ótica). Ambos os sensores foram produzidos em fibra ótica monomodo padrão G-652, dos quais o sensor RFBG foi produzido em fibra hidrogenada e submetido a

tratamento térmico para regeneração. Os dois sensores foram encapsulados com tubo capilar em aço inoxidável (AISI 304), calibrados em temperatura na faixa entre 5 °C e 60 °C. Os respectivos sensores foram fixados em chapa metálica (parede), para medir temperaturas nessa faixa de operação, com o intuito de comparar durabilidade (envelhecimento), bem como precisão e exatidão em relação a um termopar tipo K. Ao final de 16 semanas, não foram observadas degradações significativas no sinal de cada sensor e o erro de medição foi ≤ 2 °C.

PALAVRAS-CHAVE: FBG; RFBG; Durabilidade de rede de Bragg; Encapsulamento.

ANALYSIS OF AGING, PRECISION AND ACCURACY IN FBG AND RFBG OPTICAL SENSORS THAT MEASURE TEMPERATURES BETWEEN 5 °C AND 60 °C FOR 16 WEEKS

ABSTRACT: Two optical sensors were produced, characterized and maintained in operation, consisting of an FBG sensor (Fiber Bragg Grating) and an RFBG sensor (Regenerated Fiber Bragg Grating). Both sensors were produced in Standard Single-Mode Fiber G-652, of which the RFBG sensor was produced in hydrogenated fiber and subjected to heat treatment for regeneration. The two sensors were encapsulated with a stainless steel capillary tube (AISI 304), temperature calibrated in the range between 5 °C and 60 °C. The respective sensors were fixed in a metal sheet (wall), to measure temperatures in this range of operation, in order to compare durability

(aging), as well as precision and accuracy in relation to a K-type thermocouple. At the end of 16 weeks, no significant degradations were observed in the signal of each sensor and the measurement error was ≤ 2 °C.

KEYWORDS: FBG; RFBG; Bragg grating durability; Encapsulation.

1 | INTRODUÇÃO

As redes de Bragg em fibra ótica (FBG) foram descobertas em 1978 por K. O. Hill (HILL et al., 1978). Desde sua descoberta muitos trabalhos foram desenvolvidos em torno desses sensores óticos (OLIVEIRA, 2012; COSTA et al., 2015; MOURA et al., 2017; LU et al., 2018; PENG et al., 2019; FENG et al., 2020), devido as suas propriedades intrínsecas de medição de temperatura e deformação, ao mesmo tempo que são imunes a interferência eletromagnética (FRAZÃO, et al., 1999). Algumas aplicações desse tipo de sensor para medição de temperatura podem ser vistas na indústria petroquímica, pois tais sensores são aptos a operar em áreas classificadas já que não utilizam corrente elétrica (TERADA, 2010). Na biomecânica, os sensores baseados em redes de Bragg em fibra ótica utilizam-se da deformação para mensurar, por exemplo, força de mordida, aquisição de dados na aplicação de aparelhos ortodônticos e monitoração de problemas no maxilar (FIORIN et al., 2019). Também há estudos sobre o envelhecimento de sensores baseados em FBG, para avaliação de durabilidade e desempenho, por exemplo, no monitoramento de umidade em um ambiente na presença de gases residuais (ALWIS et al., 2017) e no monitoramento de vibração quando tais sensores foram encapsulados em metal (GUO; XIONG; LIU, 2019).

O método de inscrição sob máscara de fase por uma fonte *laser* ultravioleta é amplamente utilizado para gravação de redes de Bragg em fibra ótica (HILL et al., 1993), porque o método apresenta maiores estabilidade e repetibilidade da gravação quando comparado a outros métodos interferométricos (FOKINE, 2002; PAL et al., 2003; MIHAILOV et al., 2004). Para a gravação de redes sementes saturadas, para posterior processo de regeneração (OLIVEIRA, 2012), é necessária a etapa de hidrogenação da fibra ótica seguida da gravação da FBG. A hidrogenação aumenta a fotossensibilidade na fibra (PATRICK et al., 1995; EGAN et al., 1996) e uma maior fluência *laser* na banda do ultravioleta produz redes sementes saturadas, as quais são caracterizadas por espectro alargado. A regeneração pode ser obtida através de tratamento térmico adequado da fibra ótica, ao final do qual é produzida a rede de Bragg regenerada em fibra ótica (RFBG). A RFBG é caracterizada por elevada durabilidade em altas temperaturas (CANNING et al., 2009).

Os objetivos do presente trabalho são comparar a durabilidade entre dois sensores por rede de Bragg, um do tipo RFBG e um outro do tipo FBG padrão, durante um período de 16 semanas em temperatura ambiente e também avaliar a precisão e a exatidão dos referidos sensores em relação a um padrão fornecido por termopar tipo K. Ao longo do período, foram realizadas medições semanais da temperatura obtida no termopar e em ambos os sensores através da aquisição de espectros em reflexão.

2 | METODOLOGIA

Os sensores térmicos foram produzidos em segmentos de fibra ótica, monomodo padrão (SSMF G-652 Draka®), com ~33 cm de comprimento. O sensor 1 foi gravado em fibra ótica não hidrogenada, seguido de encapsulamento, calibração em temperatura e aplicação em campo. O sensor 2 teve sua rede semente gravada em fibra ótica hidrogenada, com posterior tratamento térmico para regeneração, também seguido de encapsulamento, calibração em temperatura e aplicação em campo.

2.1 HIDROGENAÇÃO

A câmara de hidrogenação é formada por tubo inoxidável, de 5 mm de diâmetro interno e 1 m de comprimento, comportando várias dezenas de fibras. Assim, um trecho de fibra ótica monomodo padrão (G-652), com 1 m de comprimento, foi inserido na câmara de hidrogenação sob pressão de 80 bar, temperatura ambiente. A fibra ótica permaneceu na câmara por um período de sete dias e, então, foi retirada para se obter um segmento de fibra necessário para a posterior gravação da rede semente do sensor 2.

2.2 GRAVAÇÃO

Ambos os sensores foram gravados com 3 mm de comprimento, utilizando o método de gravação sob máscara de fase. O *laser* utilizado nas gravações foi o Coherent® Xantos XS, com comprimento de onda de emissão em 193 nm.

O sensor 1 (FBG), possui os seguintes parâmetros de gravação: energia de 1,80 mJ/pulso, frequência de 250 Hz e tempo de exposição de 20 minutos. A máscara de fase utilizada foi a lbsen® com *pitch* de 1055,2 nm.

O sensor 2 (RFBG), possui os seguintes parâmetros de gravação: energia de 1,00 mJ/pulso, frequência de 250 Hz e tempo de exposição de 10 minutos. A máscara de fase utilizada foi a lbsen® com *pitch* de 1058,9 nm. Como a fibra ótica utilizada para a gravação do sensor 2 estava hidrogenada, foi possível utilizar menor fluência *laser* neste caso. A rede produzida resultou em eficiente regeneração após o tratamento térmico específico.

Os diferentes *pitchs* das máscaras de fase resultam em distintos comprimentos de onda de Bragg em cada sensor, porém não produzem efeitos apreciáveis na durabilidade e na precisão dos mesmos.

Na Figura 1, pode ser visto um esquemático do sistema de gravação utilizado no Laboratório Multiusuário de Fotônica, na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *campus* Curitiba. Para a monitoração das gravações foi utilizado o interrogador ótico (Micron Optics® SM 125) com resolução de 0,001 nm.

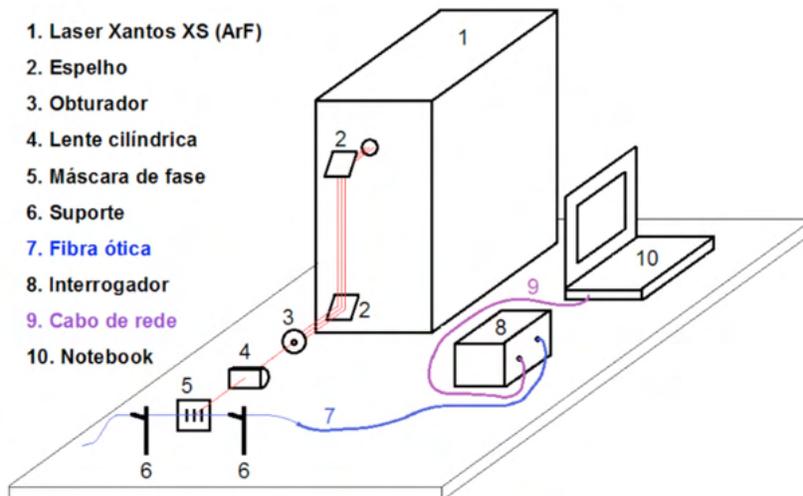


Figura 1 – Esquemático do sistema de gravação de FBG.

Fonte: Adaptado de Oliveira (2012).

2.3 TRATAMENTO TÉRMICO PARA REGENERAÇÃO

A rede semente, que produzira o sensor 2, foi submetida a um tratamento térmico para obtenção da rede de Bragg regenerada. O referido sensor foi inserido em um forno elétrico tubular, que possui controle de temperatura até 1000 °C e foi desenvolvido no próprio grupo de pesquisa. O forno foi programado, para seguir uma rampa de aquecimento, iniciando em 22 °C e atingindo 900 °C em 30 minutos. O forno permaneceu em 900 °C por mais 80 minutos, até concluir a regeneração térmica da RFBG, resultando no sensor 2, seguido de resfriamento natural pela troca de calor com o ambiente.

O *setup* de monitoração durante o tratamento térmico do sensor 2 constituiu-se de interrogador ótico, forno elétrico tubular e controlador de temperatura, conforme a Figura 2.

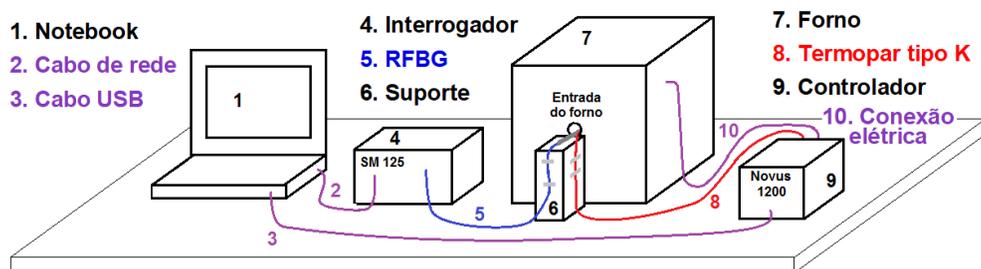


Figura 2 – Setup para monitoração do tratamento térmico do sensor 2.

O forno elétrico tubular é formado por uma resistência de níquel-cromo, posicionada a 15 cm da entrada, envolvendo um tubo em alumina com 12 mm de

diâmetro. A potência é fornecida por um relé eletrônico comandado pelo controlador Novus 1200, conforme mostra a Figura 3. A rede de Bragg foi posicionada no centro da área de aquecimento, que possui comprimento de ~3 cm. Para o monitoramento da temperatura interna do forno utilizou-se termopar tipo K ligado ao controlador, obtendo a temperatura na região próxima à FBG.

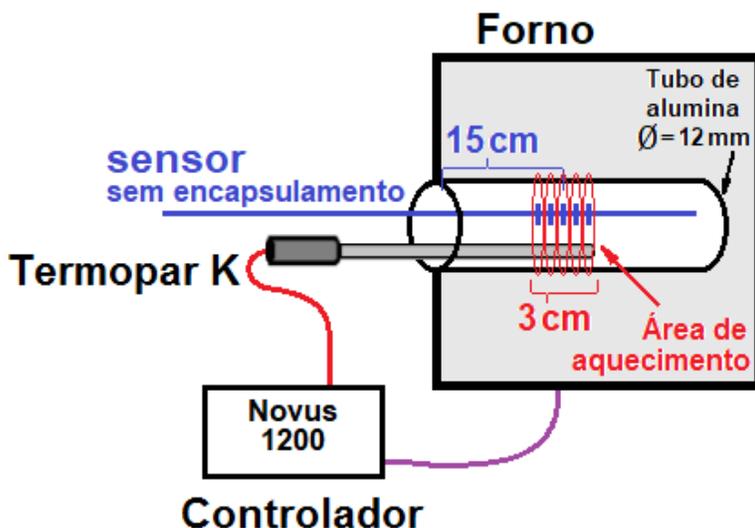


Figura 3 – Detalhes da parte interna do forno.

Fonte: Adaptado de Oliveira (2012).

2.4 ENCAPSULAMENTO

Os sensores 1 e 2 foram encapsulados utilizando um tubo capilar em aço inoxidável (AISI 304), com diâmetro interno de 0,3 mm e espessura de parede de 0,6 mm. Esta proteção é necessária para aplicações em campo, pois as fibras óticas são razoavelmente sensíveis a impacto e curvatura.

A fibra ótica possui uma proteção primária em acrilato, e outras camadas de materiais plásticos, que foram removidas para fabricação desses sensores e substituídas pelo encapsulamento em aço inox, conforme a Figura 4. A fixação entre o tubo capilar e a capa plástica externa do cordão ótico foi obtida utilizando tubo termorretrátil do mesmo tipo utilizado em isolamento de cabo elétrico.

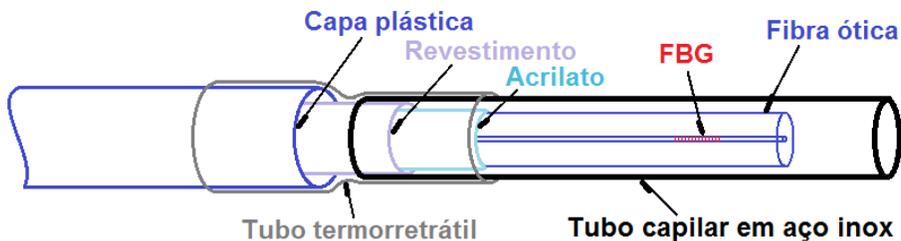


Figura 4 – Esquema do encapsulamento da FBG para medição em reflexão.

Fonte: Adaptado de Oliveira (2012).

2.5 CALIBRAÇÃO

Os sensores 1 e 2 foram calibrados para obtenção da curva de sensibilidade térmica. Para isso, utilizou-se uma pastilha termoelétrica Peltier (TEC) e controlador específico, com as temperaturas ajustadas para 5 °C, 10 °C, 20 °C, 30 °C, 40 °C, 50 °C e 60 °C, pois os referidos sensores serão operados em temperatura ambiente. Para cada temperatura selecionada foi aguardado um tempo de 5 minutos para adequada estabilização e adquiridas as medidas, de 1 em 1 minuto, totalizando 11 aquisições para cada temperatura. Para cada nível de temperatura foram realizadas as médias para os comprimentos de onda de Bragg, resultando na obtenção da curva de sensibilidade térmica.

2.6 APLICAÇÃO EM CAMPO

Os sensores foram fixados em chapa metálica (parede), próxima a uma janela do laboratório, com o auxílio de grampos metálicos parafusados. O laboratório é condicionado em $22\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$, porém, como a chapa metálica tem contato direto com o exterior, as variações de temperatura são apreciáveis. O propósito para os sensores foi medir a temperatura na chapa metálica, correlacionar com as medições de um termopar tipo K e também observar possíveis degradações na amplitude espectral (envelhecimento).

O esquema que representa as ligações entre os equipamentos, os componentes elétricos e os sensores pode ser visto na Figura 5. Para evitar a fadiga ou deficiência de acoplamento nos conectores óticos, optou-se por seleção via chave ótica do sensor a ser medido em cada operação. A chave ótica (JDS Uniphase® 1:2 *channel*) é ativada por tensão contínua de 5 V, que altera o caminho ótico entre C e porta 2 (leitura do sensor 2), para C e porta 1 (leitura do sensor 1). Como referência de temperatura, utilizou-se multímetro (ICEL® MD-6111, com resolução de 1 °C) em conjunto com termopar tipo K. Os dois sensores e o termopar foram acoplados termicamente à chapa metálica com o auxílio de pasta térmica.

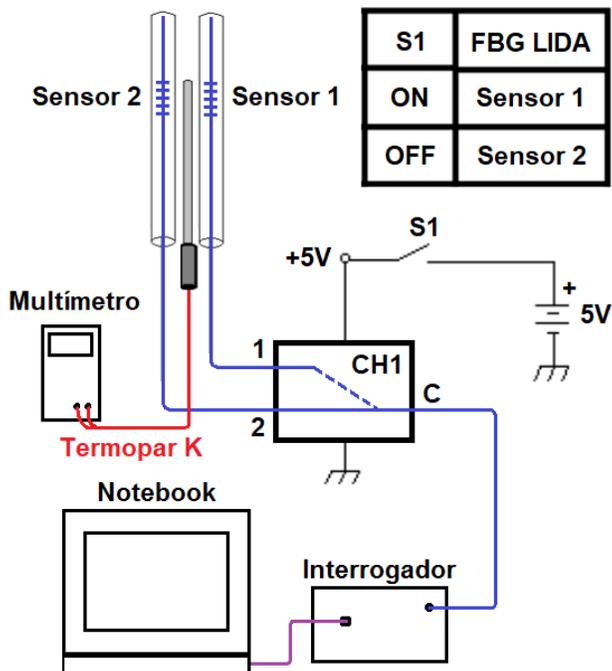


Figura 5 – Equipamentos, componentes elétricos e sensores para medição da temperatura ambiente.

Fonte: Adaptado de Oliveira (2012).

3 | RESULTADOS

Conforme a Figura 6, para o sensor 2 foram obtidos o espectro inicial (rede semente), em linha contínua, e os espectros finais após a regeneração, em linha tracejada representando o espectro da RFBG sem encapsulamento e em linha traço-ponto representando o espectro da mesma RFBG com encapsulamento. Os espectros foram obtidos em temperatura de 22 °C. É possível verificar a perda da saturação da rede de Bragg após a regeneração e seu deslocamento para um comprimento de onda menor. O encapsulamento não provocou alteração espectral significativa, indicando que a rede foi mantida sem deformação.

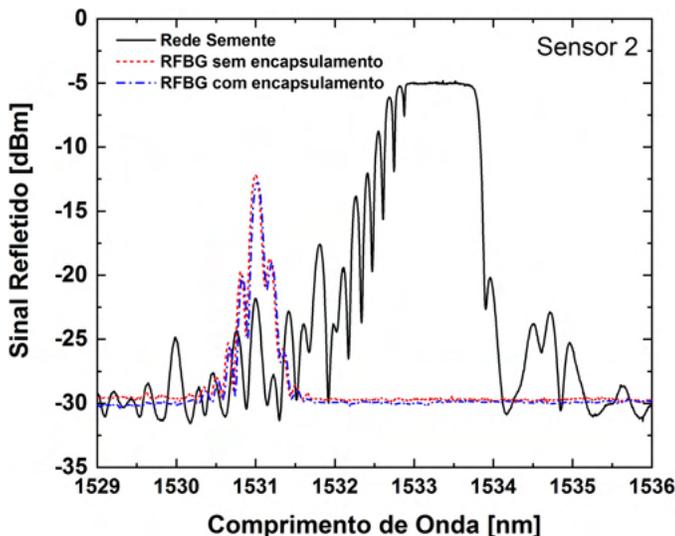


Figura 6 – Espectros em reflexão da FBG inicial (rede semente) comparada aos espectros regenerados após o tratamento térmico (RFBG com e sem encapsulamento).

Durante o tratamento térmico para obter o sensor 2, foram adquiridos os espectros, com posterior leitura de suas amplitudes, utilizando *software* comercial, resultando no gráfico mostrado na Figura 7. A temperatura (triângulos) foi elevada de 22 °C a 900 °C em 30 minutos e foi mantida em 900 °C por mais 80 minutos, totalizando aproximadamente 110 minutos. A amplitude do sinal refletido (círculos) permaneceu próxima de 26,4 dB até a temperatura atingir ~850 °C, porém a rede perdeu a saturação nessa fase. O processo foi seguido de redução gradativa na amplitude do sinal, atingindo um mínimo próximo de 8,5 dB aos 47 minutos. Por último, ocorreu a fase da regeneração (aumento gradativo do sinal) estabilizando a amplitude em aproximadamente 20 dB.

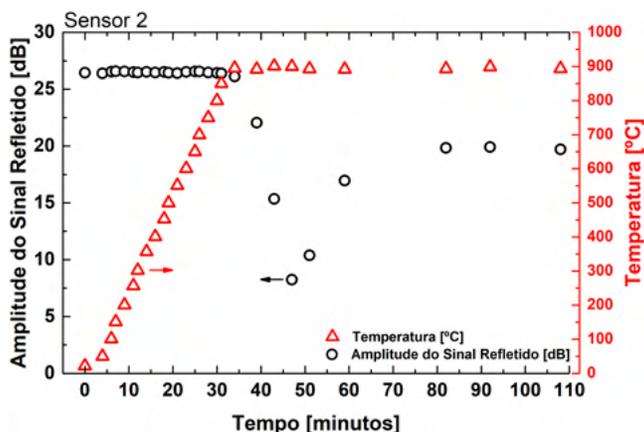


Figura 7 – Amplitude do sinal refletido comparada à temperatura do sensor 2.

Para a calibração dos sensores 1 e 2, foi utilizado uma pastilha termoelétrica Peltier (TEC). O sensor 1 apresentou sensibilidade térmica de 12,23 nm/°C e o sensor 2 apresentou sensibilidade térmica de 11,80 nm/°C, obtidas através de ajuste linear (Figura 8).

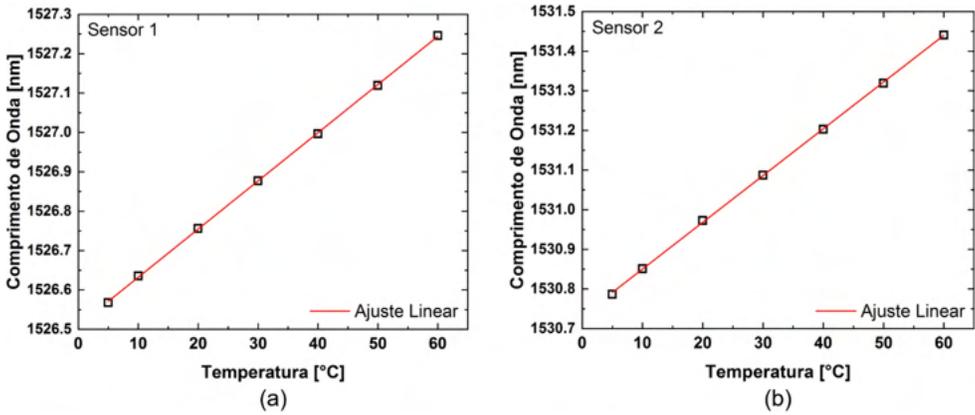


Figura 8 – Curva de sensibilidade térmica (a) do sensor 1 e (b) do sensor 2.

Durante 16 semanas, ambos os sensores monitoraram a temperatura ambiente (Figura 9). Na Figura 9.a pode-se observar, nos espectros do sensor 1, insignificantes variações nas intensidades dos sinais refletidos e os pequenos desvios no comprimento de onda são devido às diferentes temperaturas durante tais aquisições. Na semana 7, foi observado um deslocamento na linha de base, o que sugere ocorrência de flutuação na fonte ótica do interrogador. Da mesma forma, isso ocorre com o sensor 2, conforme mostra na Figura 9.b. Ainda na Figura 9.b, observa-se razoável correlação com os espectros mostrados na Figura 9.a, semana a semana, sugerindo alguma flutuação no sistema de interrogação/leitura e de temperatura entre as medições.

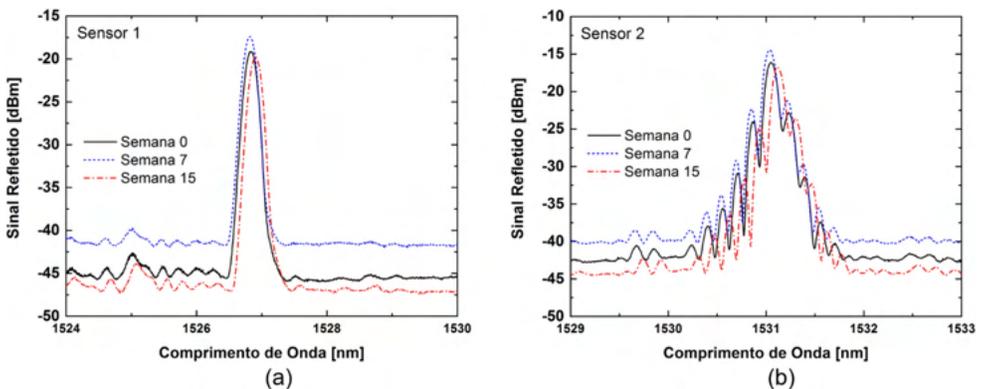


Figura 9 – Espectros em reflexão nas semanas 0, 7 e 15 (a) para o sensor 1 e (b) para o sensor 2.

A Figura 10 mostra as amplitudes dos sinais refletidos por ambos os sensores, ao longo das 16 semanas. Observa-se um padrão nas flutuações das amplitudes dos sinais refletidos pelos sensores, corroborando com uma provável flutuação na potência da fonte ótica do interrogador, como também pode ser observado nos espectros correspondentes às semanas 0, 7 e 15, mostrados na Figura 9. Aparentemente não ocorreu degradação apreciável em ambos os sensores durante o período observado.

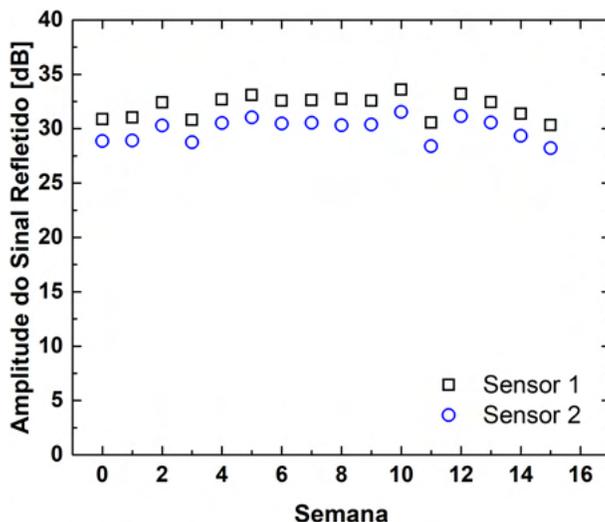


Figura 10 – Variações nas amplitudes dos sinais refletidos, correspondentes ao sensor 1 e ao sensor 2, ao longo das 16 semanas.

A Tabela 1 correlaciona as temperaturas obtidas pelos sensores 1 e 2 com a temperatura de referência, indicada no multímetro (termopar tipo K), ao longo do experimento. Para obter a temperatura através dos sensores 1 e 2, comparou-se o comprimento de onda de Bragg nos espectros adquiridos a cada semana com as respectivas curvas de calibração. Não foi observada divergência superior a 2 °C em nenhuma das medições.

Semana	Temperatura no multímetro [°C]	Temperatura no sensor 1 [°C]	Erro absoluto do sensor 1 [°C]	Temperatura no sensor 2 [°C]	Erro absoluto do sensor 2 [°C]
0	27	27	0	27	0
1	19	21	-2	21	-2
2	27	27	0	27	0
3	21	22	-1	23	-2
4	26	26	0	26	0
5	27	27	0	27	0
6	20	21	-1	21	-1
7	25	25	0	26	-1
8	24	24	0	25	-1
9	24	25	-1	26	-2
10	23	23	0	24	-1
11	23	23	0	24	-1
12	22	22	0	23	-1
13	23	23	0	24	-1
14	28	27	1	29	-1
15	33	32	1	33	0

Tabela 1 – Temperaturas do multímetro comparadas às temperaturas dos sensores ao longo das 16 semanas.

4 | CONCLUSÃO

As leituras obtidas pelos sensores 1 e 2 referenciadas ao multímetro, apresentaram diferenças máximas de 2 °C, eventualmente estando dentro da faixa de erro dos instrumentos. O experimento relatou 16 semanas e nesse tempo não foi possível mensurar perda de intensidade do sinal refletido pelos sensores óticos, até pelo fato de ter ocorrido alguma flutuação no próprio sistema interrogador, havendo uma variação de ~2 dB entre os dois sensores, o que não influencia a análise dos resultados para os objetivos propostos.

Devido a razoavelmente baixa temperatura de operação, que foi inferior a 40 °C, a durabilidade e exatidão observada nos dois sensores óticos são razoavelmente próximas, o que eventualmente poderá mudar com o transcorrer do experimento, devido ao sensor 2 ter sido produzido através de regeneração em FBG, normalmente mais estável. Ambos os sensores se mostraram adequados para aplicação em campo e apresentaram razoável precisão e exatidão em relação ao medidor de temperatura de referência. O encapsulamento proposto revelou-se eficiente, tanto pela robustez, quanto pela baixa influência sobre as características de uma FBG sem cápsula.

Os dois sensores apresentados neste trabalho continuam sob análise na mesma instalação, possibilitando novas conclusões em médio/longo prazo.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, além de ter apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). O trabalho foi desenvolvido no Laboratório Multiusuário de Fotônica, UTFPR – Curitiba.

REFERÊNCIAS

ALWIS, L. S. M.; BUSTAMANTE, H.; ROTH, B.; BREMER, K.; SUN, T.; GRATTAN, K. T. V. Evaluation of the durability and performance of FBG-based sensors for monitoring moisture in an aggressive gaseous waste sewer environment, **Journal of Lightwave Technology**, v. 35, n. 16, p. 3380-3386, 2017.

CANNING, J.; BANDYOPADHYAY, S.; STEVENSON, M.; BISWAS, P.; FENTON, J.; ÅSLUND, M. Regenerated gratings. **Journal of European Optical Society-Rapid Publications** 4, n. 09052, 2009.

COSTA, L. N. da; MOURA, C. C. de; OLIVEIRA, V. de; CHIAMENTI, I.; KALINOWSKI, H. J. Bragg gratings written with ultrafast *laser* pulses, **Journal of Microwaves**, v. 14, p. 15-24, 2015.

EGAN, R. J.; INGLIS, H. G.; HILL, P.; KRUG, P. A.; OUELLETTE, F. Effects of hydrogen loading and grating strength on the thermal stability of fiber Bragg gratings. **Optical Fiber Communication Conference**, OFC-1996, p. 83-84. San Jose, California, USA, 1996.

FENG, D.; LIU, Y.; LUO, X.; ZHANG, X. Experimental study on high temperature regeneration of fiber Bragg grating, **Proceedings of the SPIE** (2019), Beijing, China, v. 11455, p. 1-6, 2020.

FIORIN, R.; FRANCO, A. P. G. O.; SOUZA, M. A. de; FONTENELE, D. M.; JONES, I. L. G.; KALINOWSKI, H. J.; ABE, I. Case study for monitoring the rhythmic masticatory muscle activity during sleep bruxism episodes by using fiber Bragg gratings, **Journal of Lightwave Technology**, vol 37, n. 18, p. 4823-4829, 2019.

FOKINE, M. Formation of thermally stable chemical composition gratings in optical fibers. **Journal of the Optical Society of America B**, v. 19, n. 8, p. 1759-1765, 2002.

FRAZÃO, O.; ARAÚJO, F. M.; DIAS, I.; FERREIRA, L. A.; SANTOS, J. L. Sensores de Bragg em Fibra Óptica, **Jornadas de Engenharia de Telecomunicações e Computadores – JETC99**, Lisboa, Portugal, 1999.

GUO, Y.; XIONG, L.; LIU, H. Research on the durability of metal-packaged fiber Bragg grating sensors, **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 31, n. 7, p. 525-528, 2019.

HILL, K. O.; FUJII, Y.; JOHNSON, D. C.; KAWASAKI, B. S. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection fiber fabrication, **Applied Physics Letters**, v. 32, n. 10, 1978.

HILL, K. O.; MALO, B.; BILODEAU, F.; JOHNSON, D. C.; ALBERT, J. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure thorough phase mask. **Applied Physics Letters**, v. 62, n. 10, p. 1035-1037, 1993.

LU, K.; YANG, H.; LIM, K.; AHMAD, H.; ZHANG, P.; TIAN, Q.; DING, X.; QIAO, X. Effect of two annealing processes on the thermal regeneration of fiber Bragg gratings in hydrogenated standard optical fibers, **Applied Optics**, v. 57, n. 24, p. 6971-6975, 2018.

MIHAILOV, S. J.; SMELSER, C. W.; GROBNIC, D.; WALKER, R. B.; LU, P.; DING, H.; HUNRUH, J. Bragg gratings written in Al-SiO₂ and Ge-doped core fibers with 800 nm femtosecond radiation and phase mask, **Journal of Lightwave Technology**, v. 22, n. 1, p. 94-100, 2004.

MOURA, C. C. de; INACIO, P. L.; CHIAMENTI, I.; OLIVEIRA, V. de; KALINOWSKI, H. J. Regeneration characteristics of FBG written for the visible spectral range, **Proceedings of the SPIE (2017)**, Jeju, Republic of Korea, v. 10323, p. 1-4, 2017.

OLIVEIRA, V. de. **Redes de Bragg para medições em altas temperaturas**, Tese (Doutorado), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, 137 p., 2012.

PAL, S.; JANDAL, J.; SUN, T.; GRATTAN, K. T. V.; FOKINE, M.; CARLSSON, F.; FONJALLAS, P. Y.; WADE, S. A.; COLLINS, S. F. Characteristics of potential fibre Bragg grating sensor-based devices at elevated temperatures. **Measurement Science and Technology**, v. 14, n. 7, p. 1131-1136, 2003.

PATRICK, H.; GILBERT, S. L.; LIDGARD, A.; GALLAGHER, M. D. Annealing of Bragg gratings in hydrogen-loaded optical fiber, **Journal Applied Physics**, v. 78, n. 5, p. 2940-2945, 1995.

PENG, J.; ZHOU, X.; JIA, S.; JIN, Y.; XU, S.; CHEN, J. High precision strain monitoring for lithium ion batteries based on fiber Bragg grating sensors, **Journal of Power Sources**, v. 433, p. 1-7, 2019.

TERADA, G. G. **Caracterização e aplicação de sensores à fibra ótica no setor petroquímico**, Dissertação (Mestrado), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, 120 p., 2010.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Acoplamento magnético ressonante forte 84

Automação de iluminação 150

C

Cálculo de perdas de energia 39

Composto direito/esquerdo (CRLH) 117

Controle da iluminação 150

Correlação-cruzada 15

Custos anuais de construção de linhas de distribuição 39

D

Detecção 94, 154

Durabilidade de rede de Bragg 25

E

Eficiência energética 7, 150, 151, 153, 160

Encapsulamento 25, 27, 29, 30, 31, 32, 35

Energia eólica 161, 162, 168

Enlace analógico a fibra óptica 1, 13

Enlace fotônico sob baixa polarização 1

Estruturas periódicas 117

F

FBG 5, 14, 15, 16, 18, 19, 21, 22, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 35, 36, 37

Fotovoltaico 7, 94, 170, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180

Fuzzy Logic 5, 54, 55, 65, 68

I

Índice de refração negativo 117

Inteligência artificial 55

L

Lei de Kelvin 38, 39

LTE 7, 118, 125, 127, 128, 129, 136, 137

M

Metamateriais 6, 84, 117

N

Neuro-Fuzzy 127, 129, 130, 133, 134, 136, 137

O

Otimização estática 39

P

Perda de propagação 127, 128, 136

Permeabilidade negativa 117

Permissividade negativa 117

PID 6, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105

Planejamento de potência reativa 106

Proteção contra surtos 139, 140

R

Rádio propagação sobre pontes 127

Rede de fibra de Bragg (FBG) 15

Refrigerador 139, 140, 141, 146, 147, 148

Reversão 94

Revisão literária 94

RFBG 5, 25, 26, 27, 28, 31, 32

RF em fotônica 1

Rotação 161, 162, 164, 166, 167, 168, 169

S

Sensor à fibra óptica 15

Sistema DALI 150, 154, 155

Sistemas de alívio 15

Sistemas de distribuição 106, 115, 141

Sistemas de potência 106

Supercondutividade 84

Surtos elétricos 7, 139, 140, 141, 142, 144, 146, 148, 149

T

Televisor 139, 140, 141, 144, 145

Transmissão de energia sem fio 6, 84

V

Vazão 14, 15

Velocidade do vento 161, 163, 164, 165, 166, 167, 168

Vida útil 47, 139, 140, 141, 147, 148, 170

COLEÇÃO

DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

ENGENHARIA ELÉTRICA 2

- 
-  www.atenaeditora.com.br
 -  contato@atenaeditora.com.br
 -  @atenaeditora
 -  www.facebook.com/atenaeditora.com.br

COLEÇÃO

DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

ENGENHARIA ELÉTRICA 2

-  www.atenaeditora.com.br
-  contato@atenaeditora.com.br
-  [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
-  www.facebook.com/atenaeditora.com.br