

Monitoramento ótico de impactos mecânicos supervisionado por redes neurais artificiais

Marcos Aleksandro Kamizi¹, Gustavo Rafael Collere Possetti², Marcia Muller¹, José Luís Fabris¹

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial (CPGEL)

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Curitiba, Brasil

²Assessoria de Pesquisa e Desenvolvimento (APD)

Companhia de Saneamento do Paraná – Sanepar

Curitiba, Brasil

Resumo—Neste trabalho é apresentado um sistema ótico inteligente apto a localizar a posição de impactos mecânicos aplicados em um plano bidimensional. Quatro redes de Bragg em fibra ótica foram instaladas em uma placa quadrada de polimetil-metacrilato, submetida a um conjunto de impactos em condições controladas. As respostas fornecidas pelos transdutores foram utilizadas para construir e testar redes neurais artificiais. O sistema demonstrou ter a capacidade de realizar a tarefa de encontrar a posição do distúrbio, mesmo em pontos diferentes daqueles apresentados na etapa de treinamento. Nesse sentido, o maior erro quadrático médio foi de 3,78 cm.

Palavras chave—*sensor em fibra ótica; rede de Bragg; sensor inteligente; integridade estrutural.*

I. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, estudos sobre o comportamento dinâmico de estruturas, quando submetidas a algum tipo de ação, têm se mostrado extremamente importantes para o desenvolvimento de diversas áreas da Engenharia. Entre as inúmeras aplicações, podem-se citar os ensaios não destrutivos de materiais, o sensoriamento de pontes e prédios, a detecção de vibrações em fuselagem de aeronaves e o desenvolvimento de dispositivos táteis.

Alguns estudos propõem a utilização de redes neurais artificiais (RNAs) como um método para reconhecer padrões em aplicações de sensoriamento de dispositivos táteis. Utilizando sensores piezelétricos capacitivos e RNA, realizou-se a identificação do formato de contato de um objeto sobre um dispositivo tátil [1].

A utilização da RNA como método de reconhecimento de padrão possibilitou um processamento mais rápido das informações, uma vez que a gama de formatos geométricos a serem detectados foi previamente mapeada, diminuindo o tempo de processamento. Cowie et al. (2006) mostraram que as redes de Bragg em fibras óticas (FBGs) também podem ser utilizadas como sensores em dispositivos táteis. Nesse estudo, os objetos em repouso sobre um plano bidimensional foram classificados conforme sua geometria com o auxílio de RNAs [2].

Em uma abordagem dinâmica, as FBGs foram aplicadas ao sensoriamento de impactos em um plano bidimensional. As respostas de quatro redes de Bragg, dispostas nas extremidades de uma placa de polimetil-metacrilato (PMMA) e processadas por uma RNA, possibilitaram a identificação do quadrante do plano cartesiano que recebeu o impacto [3].

O uso crescente de sensores em fibra ótica é justificado pelo fato desses dispositivos apresentarem características únicas, como imunidade a interferências eletromagnéticas, massa e dimensões físicas reduzidas e capacidade de multiplexação. Além disso, estes sensores são capazes de medir diferentes parâmetros físicos, tais como temperatura, pressão, vibração e deformação, dentre outros [4-6].

As FBGs, em especial, são sensíveis à deformações longitudinais e podem ser inseridas em estruturas e compósitos. Dessa forma, elas podem ser empregadas no monitoramento da integridade estrutural dos objetos onde forem embarcadas.

O foco deste trabalho é a localização da posição cartesiana de um evento de impacto mecânico produzido em uma placa de PMMA instrumentada com FBGs e sujeita à supervisão por inteligência artificial.

II. METODOLOGIA

A. Sistema experimental

Na montagem do experimento, utilizou-se uma placa quadrada de PMMA, com 60 cm de lado e 6 mm de espessura. Em uma das faces, foi estabelecido um reticulado com espaçamento de 5 cm, formando um plano cartesiano. Quatro FBGs foram fixadas com uma cola à base de cianoacrilato nos cantos da placa. O procedimento adotado está ilustrado na Figura 1.

As redes de Bragg utilizadas foram gravadas em fibra ótica monomodo padrão com o auxílio de quatro diferentes máscaras de fase, as quais foram iluminadas diretamente por um laser de excímero KrF (Coherent, Xantos XS), operando em 248 nm. Nesse sentido, foram produzidas FBGs com comprimentos de onda de ressonância centrados em 1545, 1543, 1539 e 1537 nm. Essas FBGs foram conectadas em série, sendo que na extremidade final da fibra aplicou-se um gel casador de índice

Este trabalho é apoiado por: CAPES, CNPq, FINEP e Fundação Araucária

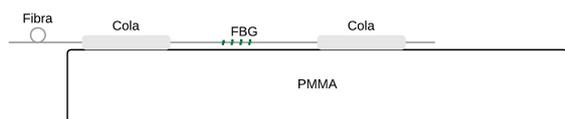


Figura 1. Representação esquemática da fixação de uma das FBGs em um dos cantos da placa de PMMA.

de refração com o objetivo de diminuir a reflexão de Fresnel na interface entre o segmento de fibra e o ar. Para a detecção simultânea dos sinais óticos provenientes das FBGs, utilizou-se um sistema constituído por um LED (Superlum, Pilot-2, com comprimento de onda variando entre 1445 e 1645 nm) e um interrogador de redes (IBSEN PHOTONICS IMON-512E, com resolução menor que 0,5 pm e frequência máxima de 970 Hz), interconectados por um circulador ótico. A representação esquemática do conjunto montado para realizar o experimento pode ser visualizada na Figura 2.

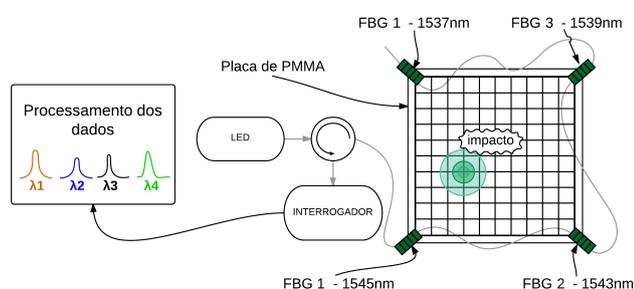


Figura 2. Diagrama esquemático do sistema experimental empregado na detecção de impactos mecânicos.

Para gerar os impactos mecânicos na placa de PMMA de forma controlada, construiu-se um equipamento composto por guias para posicionamento e um martelete. As guias são responsáveis pelo travamento da ferramenta em uma determinada posição (x, y) da placa sob estudo. O martelete construído utiliza uma bobina cilíndrica (eletroímã) que ao ser acionada atrai um pistão de material ferroso. O pistão por sua vez adentra o cilindro gerando uma força mecânica por meio de um movimento retilíneo uniformemente variado. Ao aparato adicionou-se um conjunto mecânico responsável pelo lançamento de uma haste metálica perpendicularmente ao plano da placa, quando o eletroímã é acionado. Uma vez lançada, a haste retorna ao ponto de repouso por meio de uma mola.

O conjunto é comandado por um circuito eletrônico programado para acionar manualmente os impactos. Tal programação possibilita a aplicação de um impacto por vez ou de cinco impactos simultâneos e temporizados para acontecer a cada 0,5 s. Para finalizar a montagem do equipamento, acrescentou-se uma base de poliestireno expandido com 3 cm de espessura para acomodar a placa com os sensores. A Figura 3 exibe uma foto do equipamento utilizado para gerar impactos no plano instrumentado com FBGs.

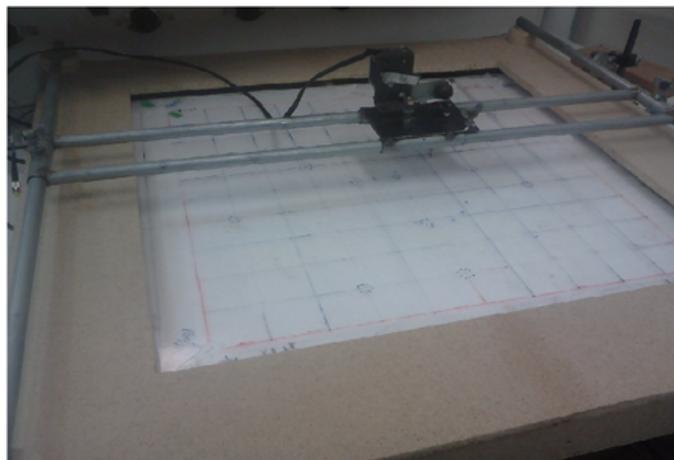


Figura 3. Foto do equipamento gerador de impactos mecânicos sobre a placa de PMMA instrumentada com FBGs.

B. Aquisição e tratamento de dados

Os experimentos foram realizados produzindo impactos em 17 posições diferentes da placa. Em cada uma delas, produziram-se 20 impactos. Os espectros de reflexão das FBGs foram mensurados para todos esses impactos e os deslocamentos espectrais foram monitorados ao longo do tempo, com uma resolução de 1,14 ms. As medições foram realizadas a temperatura ambiente, porém não foi realizado nenhum controle dessa temperatura. Todos os dados coletados foram utilizados, sem nenhum tipo de pré-seleção, ou seja, dados ruidosos também fizeram parte do conjunto das informações.

A Figura 4 exibe os sinais típicos captados pelas quatro FBGs, que correspondem ao deslocamento em comprimento de onda do pico de ressonância da rede em função do tempo, resultante de um impacto produzido na posição central da placa.

Após o processo de coleta de dados e identificação das respostas temporais das FBGs, ocorreu o tratamento das informações a fim de quantificar a energia do sinal detectado em cada um dos quatro sensores, para cada impacto. A energia foi definida como o somatório dos módulos ao quadrado das amplitudes dos deslocamentos em comprimento de onda das FBGs, obtidos em função do tempo e resultantes das perturbações geradas na placa por um dado impacto, conforme Equação 1.

$$E = \sum_{t=-\infty}^{\infty} \lambda[t]^2 \quad (1)$$

Ao término do processamento, obteve-se uma tabela inicial com 80 informações de energia (20 para cada sensor) associadas a um ponto de impacto com coordenadas (x, y). Calculou-se o valor médio dos 20 valores de energia obtidos por sensor. Esse procedimento se repetiu para os 17 pontos de impacto.

Os dados de energia obtidos nos 17 pontos de impacto foram, então, agrupados e normalizados para cada FBG.

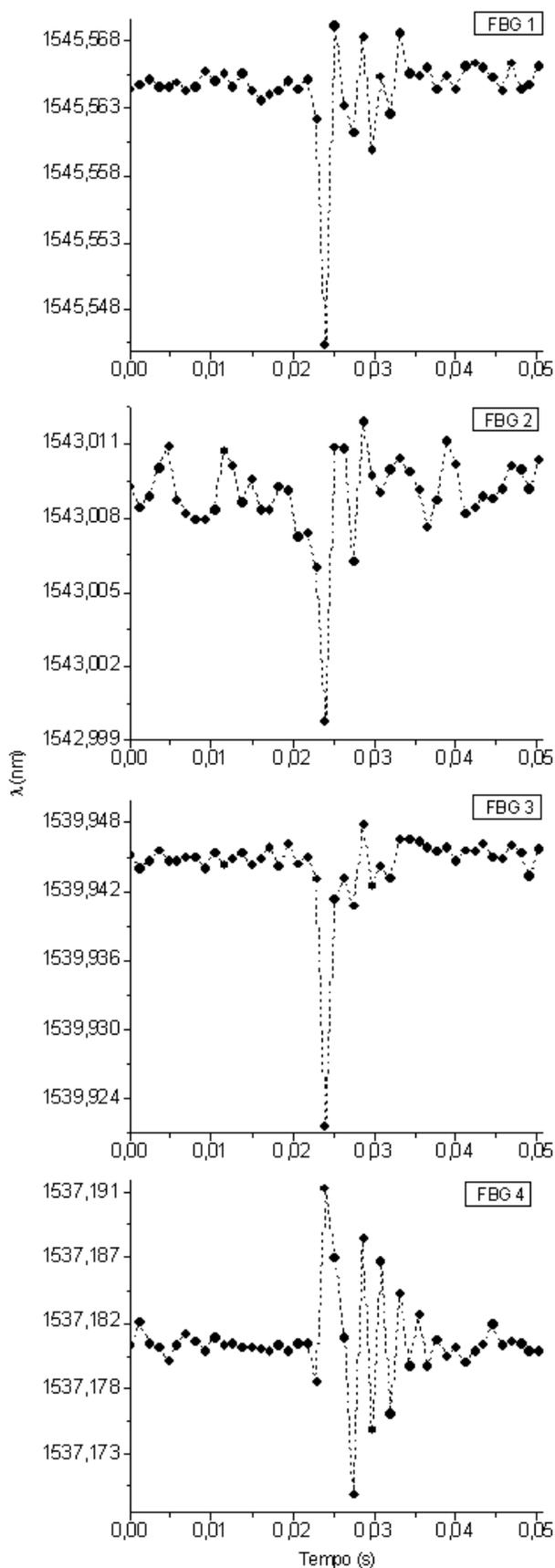


Figura 4. Sinais detectados pelas FBGs para um impacto mecânico produzido na posição central da placa.

C. Configuração da RNA

Para realizar o mapeamento entre as respostas fornecidas pelas FBGs e a coordenada (x,y) de aplicação do impacto mecânico, implementou-se uma RNA do tipo *Perceptron Multicamadas* [7]. Para tanto, adotou-se a seguinte arquitetura: 20 neurônios na primeira camada, 80 neurônios na segunda camada e 2 neurônios na camada de saída. Em todas as camadas foram empregadas funções de transferência do tipo Sigmóide. A RNA foi concebida no programa Matlab, versão 7.10 (2010).

Os valores médios e normalizados de energia dos sinais captados em cada FBG para cada ponto de impacto foram as informações utilizadas para treinar a RNA. Para isso, dos valores obtidos para os 17 pontos de impacto, 11 foram utilizados para treinamento, 3 para validação e os outros 3 para teste.

Os dados apresentados para treinamento, validação e teste foram organizados em uma matriz com quatro valores para serem apresentados à entrada do sistema (energia associada com as respostas temporais das FBGs) e dois valores de saída para cada ponto (coordenadas (x, y) referentes à aplicação do impacto mecânico). Um diagrama da estrutura da RNA empregada é apresentado na Figura 5.

O mecanismo utilizado para o treinamento das RNAs foi o “*backpropagation*” com gradiente descendente [7]. O treinamento da RNA ocorreu ao longo de 2253 épocas, sendo que a taxa de aprendizagem adotada foi de 0,3.

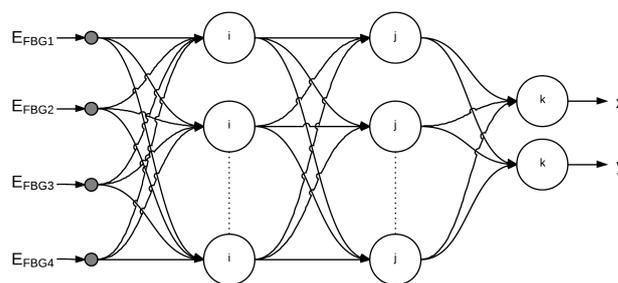


Figura 5. Diagrama da RNA

D. Métrica do erro

A análise dos dados processados pela RNA foi realizada definindo como métrica de verificação do erro a distância euclidiana entre as coordenadas do ponto de impacto e aquelas retornadas pela RNA. Além disso, também foram calculados individualmente os erros referentes às posições x e y. Para facilitar a apresentação e a visualização dos dados, os valores de coordenadas dos pontos foram normalizados. A Figura 6 mostra graficamente a aplicação da métrica para o cálculo do erro referente a coordenada (0,3; 0,3).

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A repetibilidade típica do sinal obtido com impactos produzidos na posição central da placa é representada no histograma da Figura 7. A grande dispersão da distribuição se deve à baixa taxa de amostragem utilizada na coleta das

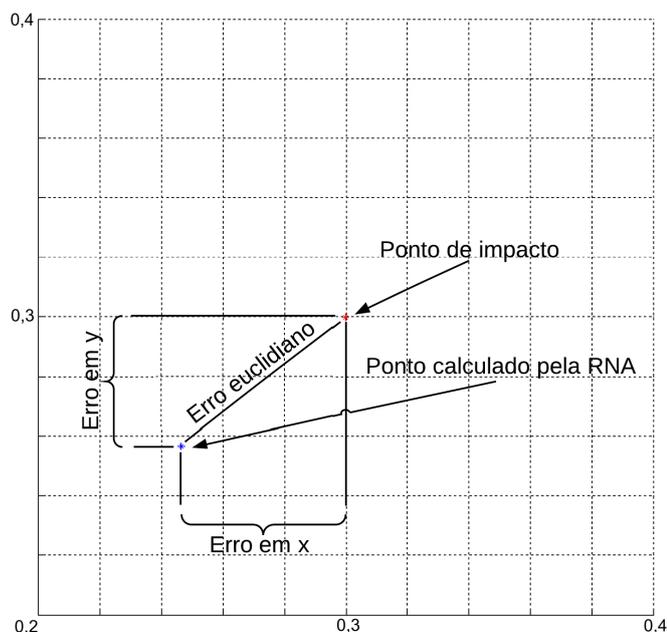


Figura 6. Exemplo de aplicação do método para o cálculo do erro referente a coordenada (0,3; 0,3) da placa instrumentada com as FBGs.

informações e, principalmente, ao mecanismo de gatilho. O equipamento de interrogação foi configurado para operar a 874 Hz. O gatilho que iniciou a coleta dos dados não foi sincronizado com o gatilho que acionou os impactos, sendo ambos acionados manualmente e em tempos diferentes. A distribuição mostrada na Figura 7 possui uma média de $71,4 \text{ fm}^2\text{s}$ com desvio padrão de $26,9 \text{ fm}^2\text{s}$. O comportamento de distribuição Gaussiana também foi verificado para os demais sensores e para as demais coordenadas da placa.

Tabela I. ERROS FORNECIDOS PELA RNA ALIMENTADA COM OS VALORES MÉDIOS DE ENERGIA.

Etapa	x	y	Erro em x (cm)	Erro em y (cm)	Erro euclidiano (cm)
Treinamento	0,6	0,6	0,05	0,40	0,40
	0,2	0,2	-1,05	-0,25	1,10
	0,8	0,8	-0,40	-0,10	0,45
	0,7	0,3	2,20	-1,30	2,55
	0,5	0,5	-3,10	1,85	3,60
	0,4	0,4	2,80	-0,70	2,90
	0,1	0,1	0,10	0,00	0,10
	0,1	0,9	0,00	0,00	0,00
	0,8	0,2	0,35	0,00	0,35
	0,3	0,7	-0,75	0,60	0,95
Validação	0,9	0,9	-4,55	0,05	4,55
	0,6	0,4	0,50	0,40	0,65
	0,9	0,1	3,55	1,25	3,75
Teste	0,3	0,3	2,65	2,15	3,40
	0,2	0,8	-6,45	2,55	6,95
	0,4	0,6	3,30	-0,45	3,35
	0,7	0,7	-0,20	0,10	0,25

A Tabela 1 e as Figuras 8 e 9 resumem o desempenho da

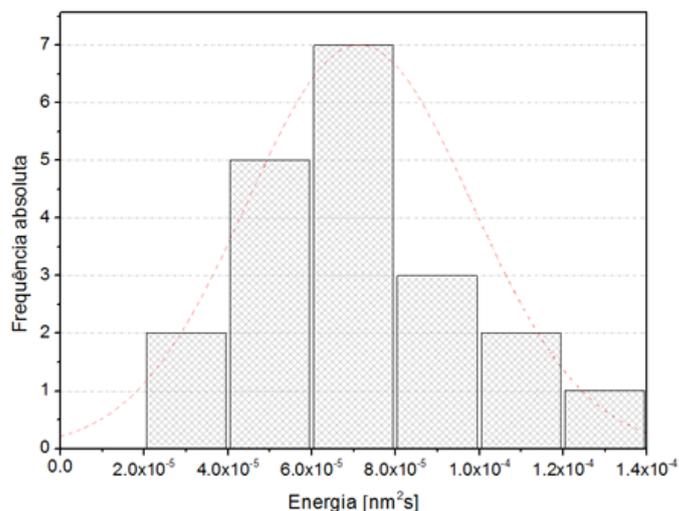


Figura 7. Histograma construído com base nas respostas fornecidas pela FBG 2 após aplicação de 20 impactos na posição central da placa.

RNA nas etapas de treinamento, validação e teste.

A partir dos dados exibidos na Tabela 1 foram calculados os erros quadráticos médios na determinação das coordenadas x e y, bem como para a distância euclidiana. Os valores obtidos para a etapa de treinamento foram de 2,63 cm, 1,06 cm e 2,84 cm, respectivamente. Para as etapas de validação e teste estes valores foram, respectivamente, 3,47 cm, 1,47 cm e 3,78 cm.

Esses resultados indicam que a RNA possui boa capacidade de generalização e que, apesar da baixa repetibilidade das medições, os valores médios de energia calculados a partir dos sinais disponibilizados pelas FBGs podem ser utilizados como parâmetros para identificar a posição da ocorrência de impactos mecânicos.

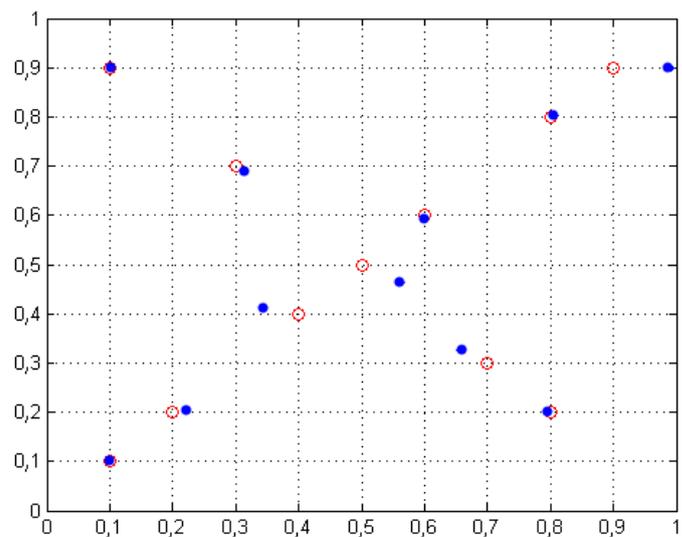


Figura 8. Valores alvo (em vermelho) e respostas fornecidas pela RNA (em azul) referentes à etapa de treinamento.

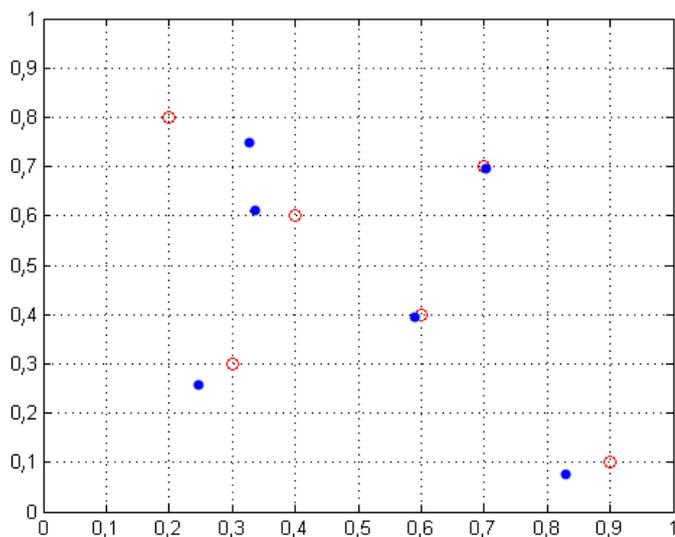


Figura 9. Valores alvo (em vermelho) e respostas fornecidas pela RNA (em azul) referentes às etapas de validação e teste.

IV. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho permitem afirmar que sensores em fibra ótica supervisionados por técnicas de inteligência artificial podem ser utilizados na monitoração dinâmica da integridade estrutural. Mesmo empregando um reduzido número de transdutores óticos, monitorados por um sistema com baixa taxa de amostragem, o sistema sensor proposto mostrou um desempenho satisfatório. Este desempenho se define em função da boa capacidade de generalização da RNA construída, a qual foi avaliada durante as etapas de validação e de teste, nas quais empregaram-se dados que não foram utilizados na etapa de treinamento. Adicionalmente, constatou-se que a energia média do sinal fornecido pelas FBGs pode ser utilizada como parâmetro para identificar as coordenadas de aplicação de impactos mecânicos em um plano. Nesse contexto, o máximo erro quadrático médio encontrado nas etapas de validação e de teste foi de 3,78 cm para a métrica de erro definida em função da distância euclidiana entre o ponto alvo e o ponto retornado pela RNA. Esse erro correspondeu a aproximadamente 4 % da maior dimensão linear do corpo de prova utilizado. A continuidade deste trabalho prevê a melhoria da RNA e a utilização de mais pontos de impactos no treinamento da rede neural.

REFERÊNCIAS

- [1] G. Canepa, J. Oliveira, M. Silva, and J. Marino, "Shape from touch by a neural net," in *International Conference on Robotics and Automation*, Maio 1992, pp. 2075–2080.
- [2] B. M. Cowie, D. J. Webb, B. Tam, P. Slack, and P. N. Brett, "Fibre bragg grating sensors for distributive tactile sensing," *Measurement Science and Technology*, pp. 138–146, 2006.
- [3] F. Ribeiro, G. R. C. Possetti, J. L. Fabris, and M. Muller, "Smart optical fiber sensor for impact localization on planar structures," *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference*, pp. 1–3, 2013.
- [4] F. Hongchao, Y. Xinhua, and H. jinbao, "Surface testing and parameter identification of vibration," *Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, pp. 617–620, 2011.

- [5] J. Yi, H. Zhang, X. Qiao, and X. Zhu, "Shape monitoring for wing structure using fiber bragg grating sensors," *Fifth International Conference on Advanced Computational Intelligence (ICACI)*, pp. 1032–1036, 2012.
- [6] J. Carvalho, J. Costa, C. S. Sales Junior, and C. Francês, "Otimização de redes de bragg em fibras usando algoritmos genéticos," *Jornal of Microwaves and Optoelectronics*, vol. 4, pp. 136–151, 2005.
- [7] S. Haykin, *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*, 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999.