

REDES NEURAIS ARTIFICIAIS: Identificação de danos em elementos estruturais

Douglas Alves de Souza¹
Emilly Tallyssa Evangelista de Souza¹
Fernando José dos Santos¹
Marielle da Silva Macedo¹
Vilson Dalla Libera Júnior²

RESUMO

Redes Neurais Artificiais (RNAs) são procedimentos computacionais que representam um exemplo matemático inspirado na estrutura neural de organismos inteligentes. Uma de suas aplicações encontra-se na Construção Civil, sendo capaz de detectar danos em elementos estruturais. Este estudo teve como objetivo investigar e analisar as RNAs e sua proficuidade na Indústria 4.0, dando ênfase na identificação de irregularidades estruturais. O mesmo se justifica pela necessidade permanente de aprimoração dos métodos de construção, dessa forma o presente artigo visa ressaltar a notoriedade das RNAs como atual ferramenta na resolução dos problemas estruturais. A metodologia de pesquisa utilizada para o desenvolvimento desse estudo é tida como uma pesquisa descritiva e exploratória, realizada por meio de uma revisão bibliográfica, a partir de métodos de pesquisa como trabalhos acadêmicos, livros, artigos e análise de sites. Por meio deste estudo percebe-se que as RNAs corroboram para o enriquecimento das técnicas na Construção Civil, voltadas para identificação de falhas, desgastes e eventuais problemas que surgem durante a vida útil das estruturas.

Palavras-chave: Construção Civil. Danos Estruturais. Indústria 4.0. Redes Neurais Artificiais.

1 INTRODUÇÃO

Desde a sua origem, a Construção Civil vem sendo um dos meios mais marcantes através do qual a civilização humana expressa sua cultura. Das grandes pirâmides do Egito, passando pelas ruínas das cidadelas de Machu Picchu e das construções góticas da Europa, até as modernas estruturas que rasgam o céu em alturas com mais de 600 metros nos Emirados Árabes e na China, é possível constatar a grande variedade de aplicações tecnológicas no setor (PORTO; KADLEC, 2018).

Com o início da industrialização, os avanços tecnológicos têm resultado em mudanças de paradigma que hoje são conhecidas como "Revoluções Industriais", tais como: avanços no campo da mecanização ou Primeira Revolução Industrial; avanços no uso intensivo da energia elétrica ou Segunda Revolução Industrial; e também nos avanços da adoção em larga escala da digitalização ou Terceira Revolução Industrial. Com o avanço da digitalização, combinado à tecnologia da internet e demais tecnologias orientadas ao futuro, observa-se uma nova mudança de modelo na Indústria. Por meio dessas expectativas do futuro, foi estabelecido o termo Indústria 4.0 (LASI et al., 2014 apud PORTO; KADLEC, 2018). A Indústria 4.0 ou Quarta Revolução Industrial é caracterizada pela autonomização, digitalização, disponibilidade de informação em tempo real, transparência e colaboração. (PFOHL, YAHSI e KURNAZ, 2017 apud RIBEIRO, 2019).

¹ Graduando(a) em Engenharia Civil pelo Centro Universitário de Anápolis (UniEVANGÉLICA) – Campus Ceres. E-mail: douglasalves9631@gmail.com; emillysouzagm@gmail.com; fernandofelipe05@hotmail.com; mariellemacedo350@gmail.com.

² Mestrado em Integridade de Materiais da Engenharia pela Universidade de Brasília (UnB). E-mail: vilson.dalla@gmail.com.

A Indústria 4.0 tem se consolidado na Construção Civil, não só com a adoção dos princípios básicos como a Realidade Aumentada (RA), Internet das Coisas (IoT), *big data*, mas também com a criação de novas tecnologias específicas para as demandas desse setor. (CAVALCANTI, et al, 2018).

Atualmente existem diferentes meios de identificação de dano, desde processos de caráter qualitativos como uma simples verificação visual, até processos mais precisos como o Método de Ultrassom (NBR 6002:2015), Método da Frequência de Ressonância (ASTM C215-14) e Método de Excitação por Impulso (ASTM E1876-15). Estes procedimentos, apesar de serem eficazes, necessitam conhecimento prévio sobre a localização do dano, uma vez que seu uso em toda a estrutura seria muito demorado. (MAIA, 2016).

Neste sentido, uma das principais tecnologias desenvolvidas para identificar danos estruturais no setor da Construção Civil (CAVALCANTI, et al, 2018) são as Redes Neurais Artificiais (RNAs) que podem ser definidas como sendo um sistema projetado para modelar a maneira como o cérebro executa uma tarefa particular, sendo comumente implementada utilizando-se componentes eletrônicos ou simulada por propagação em um computador. Assim, para alcançarem bom desempenho, as redes neurais empregam uma interligação maciça de células computacionais simples, denominadas de unidades de processamento ou “neurônios” (HAYKIN, 2001 apud FLECK, et al, 2016).

Haykin (2001) define uma RNA como um algoritmo computacional que apresenta um exemplo matemático inspirado na estrutura neural de organismos inteligentes e que adquirem conhecimento através de uma análise detalhada. Uma grande rede neural artificial pode apresentar centenas ou milhares de unidades de processamento (apud LIMA; SILVA; SERRA, 2013).

Segundo Moreira (2002) os principais privilégios do uso da RNA estão associadas à capacidade de autoadaptação, redução de falhas, resolução de problemas de forma ágil sem necessidade de implementação de regras e sua aplicação em tempo real. Ma & Khorasni (2004) definem uma rede neural, como um método rápido e ágil de ser efetuado, além de aproximar funções para aprendizagens onde é difícil criar modelos matemáticos (apud LIMA; SILVA; SERRA, 2013).

Para Ahmed (2016), as RNAs aplicadas no contexto da detecção de danos, podem proporcionar diversas vantagens, dentre as quais estão: seu processamento é relativamente rápido; ausência da necessidade de ser remodelado ou reconstruído para nova utilização, desde que tenha adquirido bons resultados durante o treinamento; possibilidade de utilizar diferentes parâmetros de vibração como dados de entrada. (apud MARCY, 2017).

Nesta perspectiva, o presente trabalho se justifica pela necessidade permanente de aperfeiçoar os métodos de construção. Sendo assim, o mesmo teve como objetivo investigar e analisar as RNAs e sua proficiência na Indústria 4.0, dando ênfase na identificação de danos em elementos estruturais.

2 METODOLOGIA

O presente estudo é resultado de uma pesquisa básica, de caráter descritivo e exploratório cujo objetivo é analisar de forma detalhada as RNAs, dando entonação na identificação de eventuais desgastes estruturais em elementos da Construção Civil. A mesma foi realizada através da utilização de métodos de pesquisa secundários como trabalhos acadêmicos, livros, artigos, dissertações de mestrado e teses de doutorado. A pesquisa foi baseada em uma revisão bibliográfica, sendo assim, o

trabalho transcorreu a partir da análise e comparação de artigos científicos encontrados nas bases de dados: Scielo, Science Direct, Repositório de Universidades e Portal de Periódicos Capes, através das seguintes palavras-chaves: Construção Civil, Danos Estruturais, Indústria 4.0, Redes Neurais Artificiais. O estudo apresenta carácter essencialmente qualitativo, uma vez que expõem a análise de conceitos e ideias dos principais autores: GOMES, GENOVESE, LI e YANG, MEHRJOO et al, MIN et al, HAKIM et al. Dessa forma, com a metodologia adotada foi possível estabelecer parâmetros entre as ideias dos trabalhos selecionados e como os mesmos abordam o tema em questão. Para o desenvolvimento do artigo foram utilizadas as referências listadas a seguir:

Tabela 1 – Artigos utilizados na elaboração do artigo científico.

Ano	Título	Base de dado	Autor(s)
2019	Tecnologias advindas da Indústria 4.0 aplicada na Construção Civil : Efeitos e Desafios da Implantação no Brasil	RIUFOP	RIBEIRO, D. A.
2018	Indústria 4.0: Desafios e Perspectivas na Construção Civil.	Revista Campo do Saber	CAVALCANTI, V.Y.S.L et al.
2018	Mapeamento de Estudos Prospectivos de Tecnologias na Revolução 4.0: Um olhar para a Indústria da Construção Civil.	ROCA	PORTO, G. B. P; KADLEC, T.M.M.
2017	Metodologia baseada em Redes Neurais Artificiais para a detecção de danos estruturais.	RIUnB	MARCY M., C. A.
2017	Otimização da Identificação de Danos Estruturais por meio da Inteligência Computacional e Dados Modais.	RIUNIFEI	GOMES, G.F.
2017	Estimativa Preliminar de Custos de Obras utilizando Redes Neurais Artificiais.	RIUFSC	DACOREGIO,F.A.
2016	Detecção de Dano Estrutural em Estruturas Planas Utilizando Redes Neurais.	RIUnB	MAIA, R. A.
2016	Monitoramento e Classificação de falhas em estruturas utilizando Redes Neurais Artificiais.	RIUNESP	CHAVES, J. S.
2016	Redes Neurais Artificiais: Princípios Básicos.	RECIT	FLECK, L. et al.
2013	Uso de Redes Neurais Artificiais na Predição de uma Etapa do Processo de Fabricação de Alumina.	ABREPRO	LIMA, H. J. R.; SILVA, R. G.; SERRA, C. M. V.

Fonte: Próprio autor (2019)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com Chen e Nagarajaiah (2008) as falhas estruturais são danos na estrutura que implicam em mudanças nas suas propriedades físicas, e conseqüentemente nas características

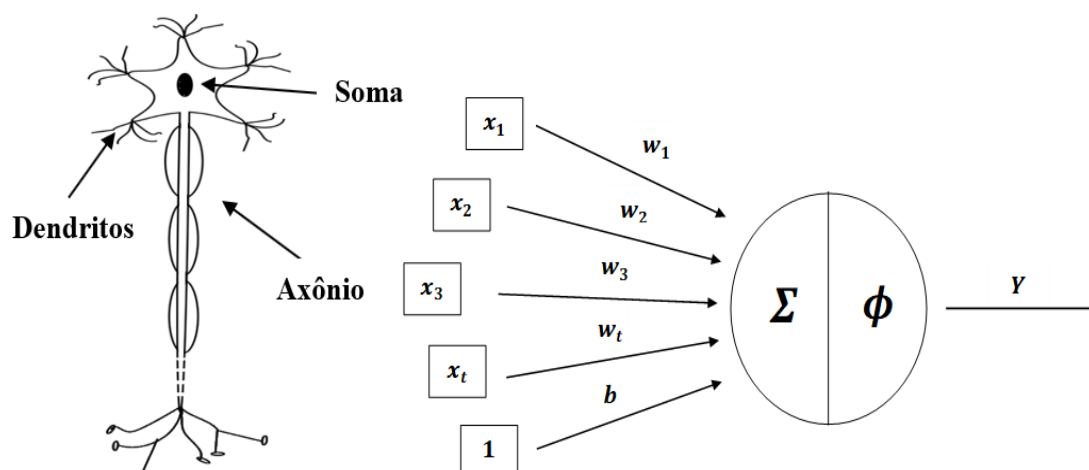
dinâmicas. Essas estruturas podem ser prédios, pontes, plataformas e etc., em que tais falhas podem influenciar no desempenho geral da estrutura, bem como causar consequências desastrosas.

Segundo Silva et al. (2014) uma edificação é a interligação lógica entre diversos materiais e componentes que possuem um tempo de vida útil, ou seja, não duram eternamente. Estes materiais e componentes podem apresentar trincas ou romper-se perante a ação de um determinado nível de carregamento, por exemplo. (CHAVES, 2016)

A identificação de dano estrutural em seus ciclos primários permite sua correção através de pequenos reparos, tornando a manutenção menos trabalhosa do que seria caso o dano fosse constatado tardiamente (MAIA, 2016). Neste contexto, pode-se citar a existência de ferramentas que, ao serem trabalhadas em conjunto com as propriedades dinâmicas, tornam-se métodos eficientes na constatação de danos, como é o caso das RNAs (MARCY, 2017). Segundo Montalvão et al. (2006), o uso de redes neurais nos procedimentos de identificação de danos tem sido motivado pela probabilidade da existência de diversos tipos de dano em vários locais distintos de uma mesma estrutura, tornando a identificação de danos um processo altamente complexo (apud GOMES, 2017).

O primeiro modelo de neurônio artificial foi sugerido por McCulloch e Pitts no ano de 1943, por isso chamado de MCP e mais conhecido por Neurônio Booleano (Figura 1(b)). No sistema neural humano, os dendritos são as ramificações responsáveis por receber os impulsos oriundos de outros neurônios e levar os sinais para o soma, ambiente no qual os impulsos são processados e novos impulsos são gerados (Figura 1(a)). O neurônio ainda é composto de uma ramificação única, mas robusta, o axônio, este tem a função de transmitir para a extremidade da célula os impulsos processados no soma, e desta forma, transmiti-los por meio de nervos terminais para outros neurônios. Esta transmissão recebe o nome de sinapse. Simulando o comportamento dos dendritos, o modelo apresenta t terminais de entrada acompanhados do viés ($b = 1$) $x_1, x_2, \dots, x_t + b$ e um único canal de saída Y , o qual se assemelha com a ramificação do axônio. w_1, w_2, \dots, w_t são pesos que se somam às entradas para determinar a ativação ou inibição destas entradas, simulando a tarefa das sinapses. Desta forma, a ativação do neurônio depende da função correspondente, que ativa ou não a saída, representada na Figura 1(b) por Σ e Φ . Além das entradas mostradas no modelo artificial, o neurônio Booleano conta com o valor unitário, conhecido por viés, e com o objetivo de polarizar as entradas do neurônio (MARCY, 2017).

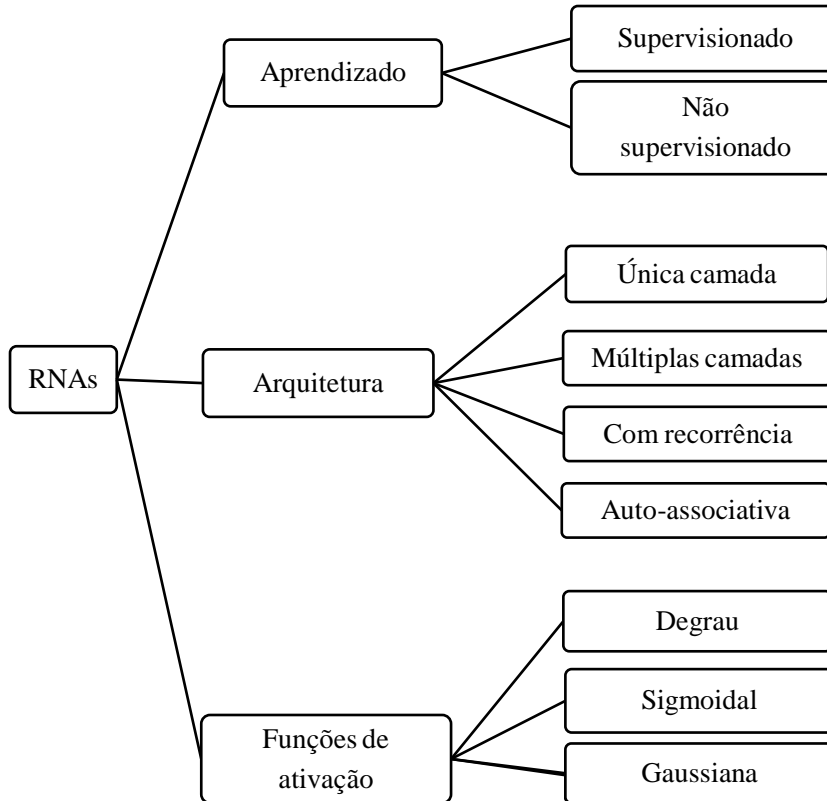
Figura 1 – (a) Neurônio humano; (b) Modelo do Neurônio Booleano.



Fonte: Próprio autor (2019)

As redes neurais podem se classificar, de modo geral e simplificado, quanto à sua forma de aprendizado (Macroestrutura), sua arquitetura (Mesoestrutura), e suas funções de ativação utilizadas em seu interior (Microestrutura) (MARCY, 2017). A Figura 2 apresenta um esquema dos diversos tipos de redes.

Figura 2 – Tipos de RNAs



Fonte: Próprio autor (2019)

As RNAs são comumente utilizadas na resolução de questões complexas, onde os modos das variáveis não são rigorosamente conhecidos. Uma de suas principais características é a capacidade de aprender através de exemplos e de generalizar a informação aprendida, gerando um modelo não linear e, tornando sua aplicação na análise espacial bastante eficiente (SPÖRL et al., 2011 apud FLECK, et al, 2016).

Há ainda outros elementos que podem ser configurados ou predeterminados na arquitetura de uma rede, como: a quantidade de camadas de neurônios e a quantidade de neurônios de cada camada; a função de transferência e treinamento e o método de aprendizagem e medição de desempenho. Definidas estas configurações, uma RNA está preparada para ser treinada com base em uma amostra, composta por entrada e saída (HAVKIN, 2001 apud DACOREGIO, 2017).

Muitos estudos na área de identificação de dano estrutural foram efetuados usando diferentes tipos de RNAs em conjuntura com as características dinâmicas dos elementos estruturais, diversificando essencialmente o algoritmo de treinamento das redes. A seguir são retratadas algumas destas investigações (MAIA, 2016):

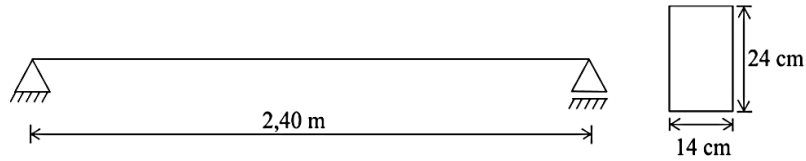
Tabela 2 – Investigações na área de identificação de dano em elementos estruturais contando com diferentes tipos de RNAs.

Autor	Material	Padrões de entrada	Resultados
Gomes (2004)	Viga numérica bi-apoiada.	Variações dos quadrados das frequências naturais.	Constatou-se que a RNA identificou com alto rigor todas as localidades avariadas para todos os panoramas de dano. Entretanto, em um cenário de dano considerando o ruído identificou-se que quanto maior a intensidade menor é o resultado da rede. Apesar disso, para um valor de ruído de 10%, a rede verificou com relativo rigor os elementos danificados, porém mensurou erroneamente o dano.
Genovese (2005)	Viga de concreto armado.	Método dos elementos finitos juntamente com ruídos.	Os métodos utilizados provaram-se eficazes, entretanto a existência de ruídos reduz esse rendimento: quanto maior o ruído, menor a eficácia dos métodos. Com a aplicabilidade das RNAs houve considerável redução nas interferências provenientes dos ruídos.
Li e Yang (2008)	Viga contínua com três vãos.	Covariância das frequências naturais de vibração	Com base dos resultados alcançados constatou-se que as RNAs localizaram e identificaram a intensidade do dano com alto rigor, com erros relativamente baixos.
Mehrjoo et al. (2008)	Articulações de pontes.	Frequências naturais e os modos de vibração da estrutura.	Os resultados obtidos denotaram que as Redes Neurais Artificiais indicaram com boa plenitude a detecção dos danos. Os erros encontrados foram relativamente baixos.
Min et al. (2012)	Duas vigas de alumínio (danificada e intacta).	Dados da impedância das estruturas.	Apresentou resultados satisfatórios, sendo apta de informar com eficiência o tipo de dano introduzido e sua intensidade. Em relação aos erros observados, pode-se dizer que giram em torno 10%.
Hakim et al. (2015)	Vigas de aço de perfil tipo I (intacta e danificada).	Cinco primeiras frequências naturais e os cinco primeiros modos de vibração.	Percebeu-se que os resultados obtidos foram satisfatórios tanto para a detecção quanto para a mensuração do dano Os erros apresentados foram menores que 13%.

Fonte: Próprio autor (2019)

Gomes (2004) usou RNAs em um estudo quantitativo para identificar danos em uma viga numérica bi-apoiada e discretizada em 24 elementos, forçando estados de dano induzidos neste elemento estrutural por meio de um programa de elementos finitos.

Figura 3 – Esquema da viga analisada e suas dimensões.

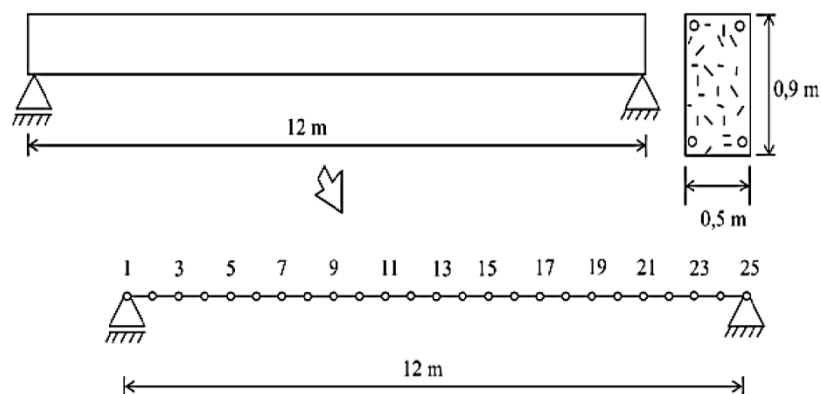


Fonte: Adaptado de GOMES (2004)

Os critérios de entrada utilizados foram às alterações dos quadrados das frequências naturais, e os critérios de saída os índices de dano em cada parte da estrutura. Constatou-se que a RNA identificou com alto rigor todas as localidades avariadas para todos os panoramas de dano, com restrição de um panorama com erros em três elementos distintos, em que o dano foi apresentado equivocadamente para componentes próximos. Ainda foi efetuado um panorama de dano considerando ruído na resposta numérica para uma razoável autenticidade e verificou-se que quanto maior a intensidade menor é a qualidade do resultado da rede. Apesar disso, para um valor de ruído de 10%, a rede localizou com referente rigor os elementos danificados, porém mensurou equivocadamente o dano.

Genovese (2005) reproduziu uma análise dinâmica experimental numericamente com intuito de constatar a utilidade do Método da Alteração na Curvatura das Formas Modais (PANDEY et al., 1991) e do Método do Erro Residual (GENOVESE, 2000) na identificação de danos em elementos estruturais. Para tal reprodução, recorreram a estruturas simples de viga de concreto armado (Figura 4) sujeitadas a sobrecargas impulsivas.

Figura 4 – Representação gráfica do modelo da viga intacta e sua seção transversal.



Fonte: Adaptado de GENOVESE (2005)

O estudo foi efetivado contando com o Método dos Elementos Finitos para moldar a estrutura e obter históricos de deslocação em função do tempo por meio da integração de *Newmark*. Estes históricos foram acrescentados de ruído com diversas intensidades, de modo a reproduzir de forma adequada um ensaio dinâmico. Utilizaram-se ainda elaborações híbridas, isto é, que agregam os procedimentos apontados à técnica de RNAs para mensurar o dano na estrutura. Os métodos utilizados provaram-se eficazes, entretanto a existência de ruídos reduz esse rendimento: quanto

maior o ruído, menor a eficácia dos métodos. Quando estes métodos foram utilizados em conjuntura com as RNAs, houve um declínio relevante nas interferências ocasionadas pelo ruído.

Li e Yang (2008) desenvolveram técnicas de detecção de dano em vigas usando RNAs fundamentadas na resposta dinâmica da estrutura. Nesta técnica, as variâncias conjuntas das respostas estruturais são utilizadas como parâmetros para detecção de dano. Para tanto, uma RNA do tipo *feedforward* aplica a variância conjunta das frequências naturais de vibração como padrão de entrada e a saída da rede constitui-se na posição do dano e na condição da estrutura (danificada ou intacta). A viga foi dividida em 30 partes, e em cada panorama de dano uma ou mais partes suportou uma diminuição na inércia entre 10% e 60%. Com base nos resultados alcançados pela rede verificou-se que a RNA identificou e constatou a intensidade do dano com alto rigor.

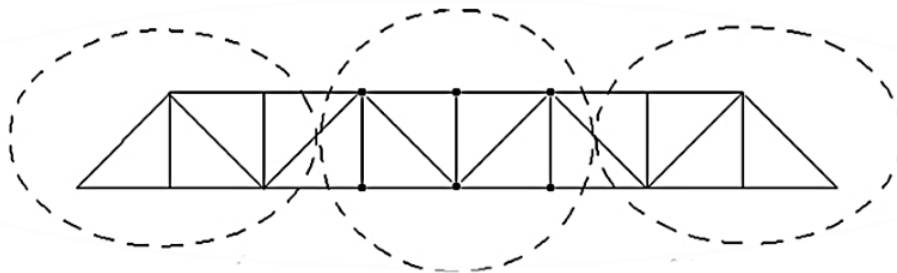
Figura 5 – Modelo de viga contínua com três vãos.



Fonte: Adaptado de LI; YANG (2008)

Mehrjoo et al. (2008) usaram RNAs da classe *feedforward* para calcular a veemência de danos existentes em articulações de pontes. Considerando-se o fato de as estruturas analisadas serem de grande dimensão, com várias articulações e, conseqüentemente, muitos padrões a serem verificados, foi realizada uma separação da estrutura em três submodelos aptos a retratar a ponte como um todo.

Figura 6 – Divisão da ponte em três submodelos.

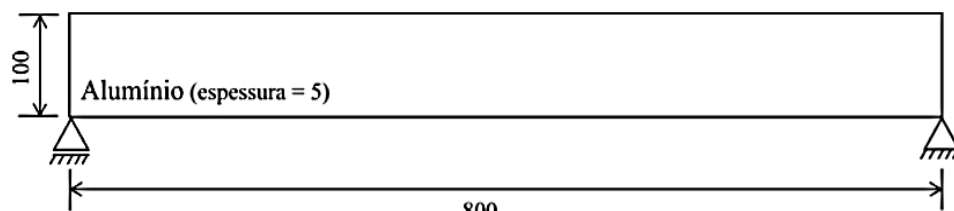


Fonte: Adaptado de MEHRJOO et al. (2008)

A RNA utilizou como padrões de entrada as frequências naturais e os modos de vibração das estruturas examinadas e angariou como saída às intensidades dos danos presentes. A capacitação da rede foi efetuada com os dados angariados dos submodelos, com a finalidade de diminuir o ciclo de processamento. Os resultados obtidos denotaram boa precisão na detecção dos danos.

Min et al. (2012) pesquisaram um método de vistoriamento da integridade estrutural em função da variação na impedância de duas vigas de alumínio, sendo uma danificada e outra intacta.

Figura 7 – Dimensões, em milímetros, das vigas de alumínio estudadas.

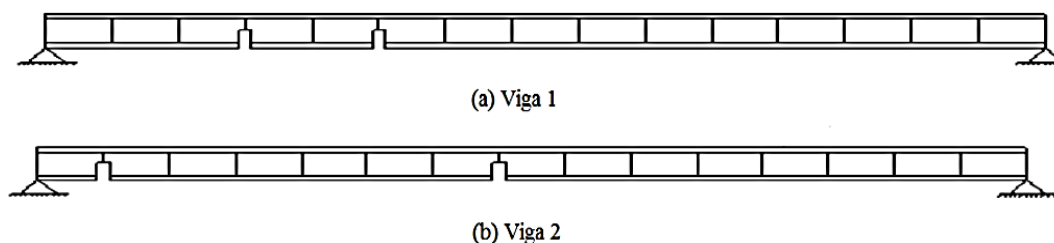


Fonte: Adaptado de MIN et al. (2012)

Uma RNA foi instruída com os padrões da impedância das estruturas com o propósito de identificar o dano e ainda diferenciar o tipo e a gravidade do mesmo. A RNA proposta foi autenticada por meio da detecção de parafusos lasseados e entalhes em uma viga de alumínio conectada por parafusos e uma estrutura tubular em escala limitada. Enfim, a RNA foi testada com dados obtidos por sensores sem fio de impedância ligado a uma ponte em escala natural. Efetivou-se que a RNA manifestou erros em torno de 10%, entretanto, foi eficiente em informar com precisão o tipo de dano introduzido e sua intensidade.

Hakim et al. (2015) recorreram as RNAs para detectar e mensurar danos em vigas de aço de perfil tipo I, dispoendo como princípio o comportamento dinâmico das mesmas. A rede neural foi treinada usando os cinco primeiros modos de vibração e as cinco primeiras frequências naturais alcançados através do estudo experimental e representações quantitativas das vigas I danificadas e intactas. Foram elaborados diversos panoramas de danos distintos, que constataram quatro locais deteriorados e 25 intensidades distintas para cada local. A localização do par de pontos deteriorados para as duas vigas analisadas é mostrada na Figura 8.

Figura 8 – Localização do par de elementos danificados em cada.



Fonte: Adaptado de HAKIM et al. (2015)

As frequências naturais de vibração angariadas numericamente exibiram um erro inferior a 13% em relação às mesmas frequências angariadas experimentalmente. Posteriormente, foi executada uma RNA para detecção e mensuração do dano introduzido nas vigas, tendo como padrões de entrada os modos de vibração e a primeira frequência natural de vibração das mesmas. Percebeu-se que os resultados obtidos foram satisfatórios tanto para a detecção quanto para a mensuração do dano (apud MAIA, 2016).

4 CONCLUSÕES

Em síntese, as RNAs são estruturas de programação baseadas no funcionamento de neurônios cerebrais imitando seus meios de conexões. A ideia é copiar este mecanismo, dando sinais de entrada e este realizando uma verificação para decidir se o sinal deve ser retransmitido ou não em sinais binários.

Tendo em vista os aspectos analisados ao longo deste artigo, verificou-se que identificar danos estruturais em seus ciclos primários permite que sejam feitos reparos para conservar a integridade da estrutura. Neste contexto, as RNAs configuram-se como boa ferramenta na identificação, mensuração e constatação da intensidade do dano em elementos estruturais, visto que tais aspectos foram comprovados pelos autores Gomes, Genovese, Li e Yang, Mehrjoo et al, Min et al e Hakim et al. Ademais, no que se refere as interferências provenientes de ruídos, Gomes e

Genovese desenvolveram estudos e comprovaram que quanto maior a interferência causada por ruídos, menor é a eficiência das RNAs. Ainda assim, com os erros encontrados, as RNAs são eficientes em informar com precisão o tipo de dano, sua intensidade e localização. Por fim, desenvolver técnicas que busquem aprimorar as funcionalidades das RNAs é imprescindível, uma vez que corrobora para a melhora de seu desempenho.

REFERÊNCIAS

- CAVALCANTI, V. Y. L.; SOUZA, G. H.; SODRÉ, M. A. C.; ABREU, M. S. D.; MACIEL, T. S.; J. M. A. SILVA. (2018). Indústria 4.0: Desafios e Perspectivas na Construção Civil. **Revista Campo do Saber - Revista da Área de Humanas do Instituto de Educação Superior da Paraíba**. v. 4, n. 4, p. 146-158, ago./set. 2018 ISSN 2447-5017. Disponível em: <<http://periodicos.iesp.edu.br/index.php/campodosaber/index>>. Acesso em: 19 out 2019.
- CHAVES, J. S. (2016) Monitoramento e Classificação de Falhas em Estruturas utilizando Redes Neurais Artificiais **71 f. Dissertação de Mestrado em Mecânica dos Solos - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira**. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/143116>>. Acesso em: 11 out 2019.
- DACOREGIO, F. A. (2017) Estimativa preliminar de custos de obras utilizando redes neurais artificiais **Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/186993>> Acesso em: 19 set 2019.
- FLECK, L.; TAVARES, M. H. F.; EYNG, E.; HELMANN, A. C.; ANDRADE, M. A. M. (2016) Redes Neurais Artificiais: Princípios Básicos. **Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Medianeira** v. 1, n. 13, p. 47-57, jan./jun. 2016 ISSN 2175-1846. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/recit/article/view/4330>>. Acesso em: 26 out 2019.
- GOMES, G. F. (2017). Otimização da Identificação de Danos Estruturais por meio de Inteligência Computacional e Dados Modais. **188 f. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Itajubá**. Disponível em: <<https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/978>>. Acesso em: 14 set 2019.
- LIMA, H. J. R; SILVA, R. G.; SERRA, C. M. V. (2013) Uso de Redes Neurais Artificiais na predição de uma etapa do Processo de Fabricação de Alumina. **XXXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. A Gestão dos Processos de Produção e as Parcerias Globais para o Desenvolvimento Sustentável dos Sistemas Produtivos, Salvador, BA. 2013**. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2013_TN_STO_182_040_22456.pdf>. Acesso em: 27 out 2019.
- MAIA, R. A. (2016). Detecção de Dano Estrutural em Estruturas Planas Utilizando Redes Neurais. **Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 94p**. Disponível em: <<http://repositorio.unb.br/handle/10482/23222>>. Acesso em: 24 out 2019.
- MARCY M., C. A. (2017). Metodologia baseada em Redes Neurais Artificiais para a detecção de Danos Estruturais. **Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 203p**. Disponível em: <<http://repositorio.unb.br/handle/10482/32151>>. Acesso em: 16 out 2019.

PORTO, G. B. P; KADLEC, T. M. M. (2018). Mapeamento de Estudos prospectivos de Tecnologias na Revolução 4.0: um olhar para a Indústria da Construção Civil. **68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.** Disponível em: < <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/9801> >. Acesso em: 12 out 2019.

RIBEIRO, D. A. (2019) Tecnologias advindas da Indústria 4.0 aplicada na construção civil: efeitos e desafios da implantação no Brasil. **2019. 62 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto.** Disponível em: < <https://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/2045>>. Acesso em: 25 out 2019.