



Estimación mediante Redes Neuronales de las frecuencias naturales de vigas dañadas de material compuesto

P. Rubio Herrero ¹, B. Muñoz-Abella ², I. Ivañez del Pozo ³, L. Rubio Ruiz de Aguirre ⁴

¹ Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid, prubio@ing.uc3m.es

² Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid, mmunoz@ing.uc3m.es

³ Dpto. Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras. Universidad Carlos III de Madrid, idel@ing.uc3m.es

⁴ Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid, lrubio@ing.uc3m.es

Las Redes Neuronales Artificiales (RNAs) son técnicas no paramétricas que se utilizan frecuentemente debido a que permiten abordar problemas de ingeniería complejos, tales como problemas de predicción y optimización. En el presente trabajo se ha desarrollado una metodología, basada en RNAs, que estima el valor de las cuatro primeras frecuencias naturales de vigas dañadas de material compuesto que combinan pieles de polímeros reforzados con fibra de carbono y núcleo de nido de abeja en función de la velocidad de rotación y de las características del defecto (tamaño y localización).

Las palas de los aerogeneradores son componentes mecánicos que suelen simplificarse en forma de vigas giratorias para su estudio. Estos elementos pueden sufrir daños durante su vida útil. Numerosas investigaciones se han centrado en la detección de defectos en componentes mecánicos, permitiendo el desarrollo de planes de mantenimiento adecuados para evitar pérdidas asociadas al fallo de todo el sistema. En la actualidad, las palas de los aerogeneradores suelen estar fabricadas con estructuras sándwich compuestas por pieles de laminados de fibra de vidrio y núcleos de espuma polimérica. Sin embargo, debido al aumento del tamaño de los aerogeneradores, es necesario buscar materiales más ligeros y resistentes para las palas, con el fin de reducir el peso de todo el conjunto. Por ello, en este trabajo se han utilizado estructuras sándwich que combinan pieles de polímeros reforzados con fibra de carbono y núcleo de nido de abeja.

Los datos necesarios para entrenar la RNA se han obtenido a partir de un modelo numérico dinámico tridimensional de una viga sándwich con una discontinuidad transversal en el núcleo. Las frecuencias naturales de la viga se han obtenido aplicando la FFT a las aceleraciones calculadas por el modelo. La red neuronal artificial propuesta presenta una excelente alternativa para el análisis de la respuesta vibratoria de vigas sándwich dañadas, ya que es eficiente y fácil de usar, a la vez que tiene un bajo coste computacional.

1. Introducción

La energía eólica es una de las fuentes de energía renovables con mayor potencial y su crecimiento está experimentando un notable impulso. Uno de los elementos constitutivos principales de los sistemas de energía eólica son las palas. La integridad estructural de éstas puede verse amenazada por la presencia de defectos, que pueden dar lugar a roturas catastróficas o a elevados costes de mantenimiento. Por ello, es fundamental contar con técnicas de detección de defectos que faciliten la implementación de planes de mantenimiento adecuados, evitando así pérdidas derivadas del fallo total del sistema.

Al abordar el estudio dinámico de este tipo de elementos, las palas con geometrías complicadas se modelan habitualmente de manera simplificada utilizando vigas rotatorias. En las últimas décadas, numerosos autores han estudiado la detección de defectos en componentes mecánicos [1-5]. No obstante, son pocos los estudios dedicados a la estimación de defectos en palas rotatorias dañadas. Asimismo, la mayoría de estas investigaciones se han centrado en el estudio de palas hechas de materiales convencionales [1, 4-5]. Sin embargo, las palas de aerogeneradores normalmente se fabrican con materiales compuestos y la detección de fallos en vigas rotatorias de material compuesto dañado es un campo menos explorado [2-3]. Generalmente, se suelen utilizar estructuras sándwich, formadas por pieles de laminados de fibra de vidrio (GFRP) y núcleos de espuma polimérica (foam). No obstante, con el aumento del tamaño de los aerogeneradores, surge la necesidad de emplear materiales más ligeros, pero igualmente resistentes para las palas, con el fin de reducir su peso. Por esta razón, en este estudio se ha optado por estructuras sándwich que combinan núcleos de nido de abeja (honeycomb) y pieles de polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP). Para el núcleo, se propone el uso de núcleos de nido de abeja, que consisten en celdas unitarias unidas de forma similar a un panal de abejas, lo que minimiza la cantidad de material utilizado, reduciendo así el peso y proporcionando una excelente resistencia [6], y para las pieles, se proponen materiales compuestos de fibra de carbono (CFRP) que poseen un reducido peso y unas excelentes propiedades mecánicas [7]. En cuanto a la detección de defectos en vigas rotatorias fabricadas con este tipo de materiales, los autores no han encontrado estudios previos en la literatura disponible.

Las Redes Neuronales Artificiales (RNAs) han sido empleadas por diversos investigadores en el campo de la ingeniería. Estos sistemas computacionales se inspiran en el sistema nervioso biológico y están compuestos por varias capas: una capa de entrada, capas intermedias denominadas ocultas, y una capa de salida. La RNA aprende a establecer la relación entre los datos de entrada y los de salida a través de un proceso de entrenamiento. Las RNAs han demostrado ser útiles en la detección e identificación de defectos en componentes mecánicos [8-9].

En este artículo, se ha utilizado una Red Neuronal Artificial (RNA) para calcular las frecuencias naturales de una viga rotatoria de material compuesto con pieles de polímeros reforzados con fibra de carbono y núcleo de nido de abeja que presenta una discontinuidad transversal en el núcleo. Para ello, se ha desarrollado un modelo 3D de elementos finitos en el código Abaqus/Implicit de una viga rotatoria de material compuesto y se han estudiado en detalle las características vibratorias de la misma en función del tamaño y la localización de la discontinuidad y de la velocidad de rotación. Se ha elegido la aceleración de un punto de la sección ubicado en el extremo de la viga como señal de salida del modelo numérico. La señal ha sido procesada para obtener las frecuencias de la viga rotatoria. A partir de los datos del modelo numérico, se ha derivado la RNA. La metodología propuesta ofrece una excelente opción para analizar las vibraciones de vigas rotatorias dañadas fabricadas con estructuras sándwich formadas por pieles de CFRP y un núcleo de nido de abeja.

2. Modelo de la viga rotatoria

2.1. Planteamiento del problema

Se ha considerado una viga rotatoria fabricada de material compuesto que combina pieles de laminados de fibra de carbono (CFRP) y núcleo de nido de abeja (honeycomb) de Nomex[®] cuyas dimensiones pueden verse se la Figura 1. La viga gira con sentido antihorario alrededor del eje de revolución Y con velocidad angular constante Ω y presenta una discontinuidad en el núcleo a una distancia L_a del extremo de la viga.

Se ha analizado el comportamiento vibratorio en función de las siguientes variables:

- **El tamaño relativo de la discontinuidad** $\alpha = d_t/L$. Se han considerado diferentes tamaños relativos de la discontinuidad en el núcleo: $\alpha = 0, 0.01, 0.02$ y 0.03 , siendo el valor $\alpha = 0$ correspondiente a una viga intacta. La Figura 2 muestra la geometría de la discontinuidad transversal.
- **La ubicación relativa de la discontinuidad** $\xi = L_b/L$. Hemos considerado las siguientes ubicaciones: $\xi = 0.14, 0.355, 0.57$ y 0.785 .
- **La velocidad de giro** Ω . Se han considerado 8 velocidades de giro de la viga ($\Omega = 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90$ y 100 rad/s).

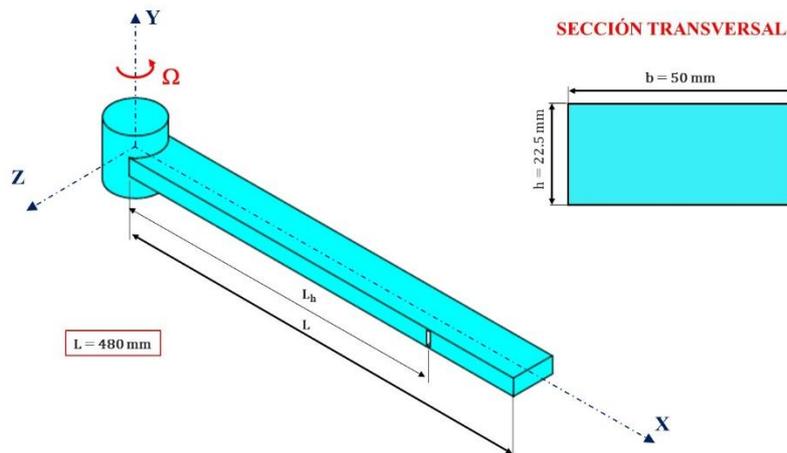


Figura 1: Modelo geométrico.

TAMAÑO RELATIVO DE LA DISCONTINUIDAD TRANSVERSAL	
$\alpha = 0.01$	$d_1 = 4.8 \text{ mm}$ $d_2 = 9.6 \text{ mm}$
$\alpha = 0.02$	$d_1 = 9.6 \text{ mm}$ $d_2 = 14.4 \text{ mm}$
$\alpha = 0.03$	$d_1 = 14.4 \text{ mm}$ $d_2 = 19.2 \text{ mm}$

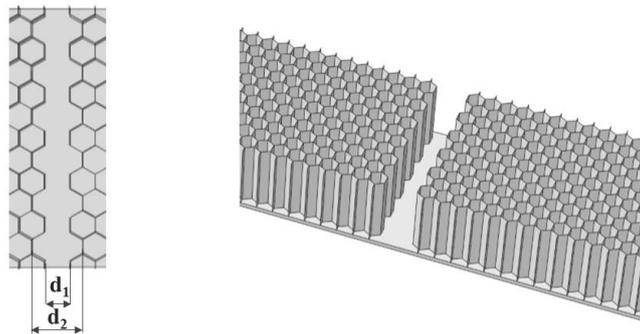


Figura 2: Diferentes tamaños de la discontinuidad transversal.

La viga sándwich está formada por dos pieles exteriores de material compuesto laminado de fibra de carbono (CFRP) y núcleo de nido de abeja (honeycomb) de Nomex®. Las pieles constan de un laminado de 16 láminas de fibra de carbono en matriz epoxi, IM7/MTM-45-1 con una secuencia de apilamiento igual a $[0/+45/90/-45]_{2S}$ [10]. El núcleo de nido de abeja está fabricado en Nomex® con denominación ANA-3.2, y está formado por celdas hexagonales y huecas, con una densidad nominal de 48 kg/mm^3 [11]. En la Tabla 1 se muestran las propiedades de las pieles y del núcleo. Las direcciones 1, 2 y 3, coinciden con las direcciones X, Y y Z respectivamente.

Tabla 1: Propiedades de las pieles y del núcleo

Láminas fibra de carbono		Nomex®	
Densidad	1600kg/m ³	Densidad	1500 kg/m ³
Módulo de Young E_1	173 GPa	Módulo de Young E_1	3,95 GPa
Módulo de Young $E_2 = E_3$	73,6 GPa	Módulo de Young E_2	5,05 GPa
Coefficiente de Poisson ν_{12}	0.32	Coefficiente de Poisson ν_{12}	0.2
Coefficiente de Poisson $\nu_{13} = \nu_{23}$	0.5	Módulo de cortadura G_{12}	1,6 GPa
Módulo de cortadura en el plano G_{12}	3,89 GPa	Módulo de cortadura G_{13}	1,6 GPa
Módulo de cortadura fuera del plano G_{13}	3,89 GPa	Módulo de cortadura G_{23}	1,6 GPa

2.2. Modelo numérico

Se ha llevado a cabo un estudio numérico mediante el software de elementos finitos Abaqus 6.14 [12]. Se ha realizado un modelo dinámico 3D de una viga sándwich que consta de varios sólidos: el primero corresponde a la viga sándwich (con propiedades de sólido deformable) y el segundo corresponde a la parte rígida (con propiedades de sólido rígido) que simula un eje físico de rotación. Para la unión de ambos sólidos se ha utilizado una interacción "Tie" (según la nomenclatura de Abaqus) que imposibilita el desplazamiento relativo entre los mismos. En la viga sándwich, el núcleo y las pieles se han modelado por separado y también se han unido mediante una interacción "Tie". La velocidad de giro se ha modelado como un campo predefinido constante de velocidad angular sobre toda la viga. Se ha definido un tiempo de simulación de los modelos suficiente para estudiar 7 revoluciones completas de la viga, ya que con éstas se alcanza la convergencia de los resultados, generando un dato cada 100 μ s.

En relación al mallado, se han utilizado tres tipos de elementos (ver Figura 3). Para la parte rígida, se han usado elementos rígidos triangulares lineales de 3 nodos (R3D3 según la nomenclatura de Abaqus). Para las pieles, se han utilizado elementos hexaédricos de 8 nodos, de integración reducida y control de hourglass (SC8R según la nomenclatura de Abaqus). Por último, para el modelado del núcleo de nido de abeja, se han utilizado elementos tipo membrana (Shell) triangulares lineales de 3 nodos (S3 según la nomenclatura de Abaqus). La malla del modelo comprende aproximadamente 100000 elementos y 160000 nodos. Para determinar el tamaño adecuado de la misma se ha realizado un análisis de sensibilidad hasta observar una convergencia de los resultados.

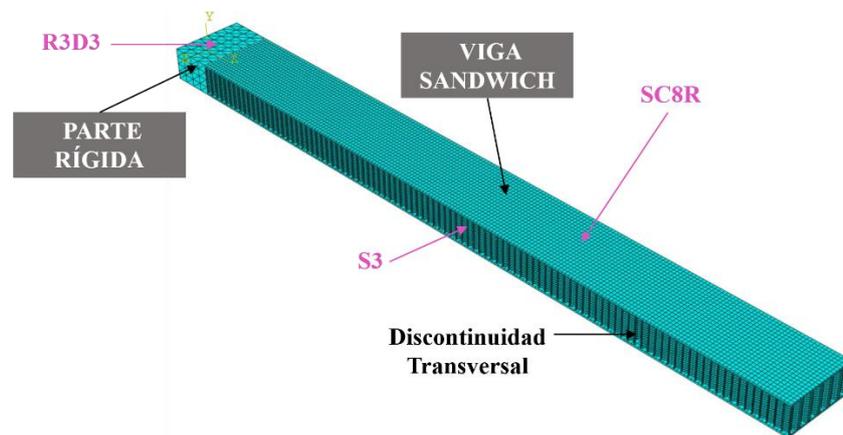


Figura 3: Mallado de la viga.

2.3. Resultados del modelo numérico

Antes de obtener los resultados de las frecuencias se procedió a validar el modelo numérico desarrollado mediante la comparación de sus resultados con los resultados obtenidos de la literatura. Los resultados de esta comparación se encuentran en un trabajo previo de los autores [13].

Una vez validado el modelo numérico, se obtuvieron las cuatro primeras frecuencias naturales para todos los casos considerados. Dado que éstas no se pueden obtener directamente del modelo numérico, como señal de salida del mismo se ha tomado la aceleración de un punto situado en el extremo de la viga y se ha procesado la señal para obtener las frecuencias naturales. El procesamiento de la señal se ha hecho mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT) [13]. En primer lugar, en la Figura 4 se ha representado la amplitud en función de la frecuencia para las cuatro primeras frecuencias naturales para una viga sin dañar para las distintas velocidades de giro. Se puede observar cómo a medida que aumenta la velocidad de giro aumenta el valor de la amplitud y de frecuencia natural, lo que tiene sentido, ya que al aumentar la velocidad de giro aumenta la rigidez de la viga [5]. Esta diferencia es más notable a partir de la segunda frecuencia natural. Estos resultados son análogos a los obtenidos para las vigas dañadas.

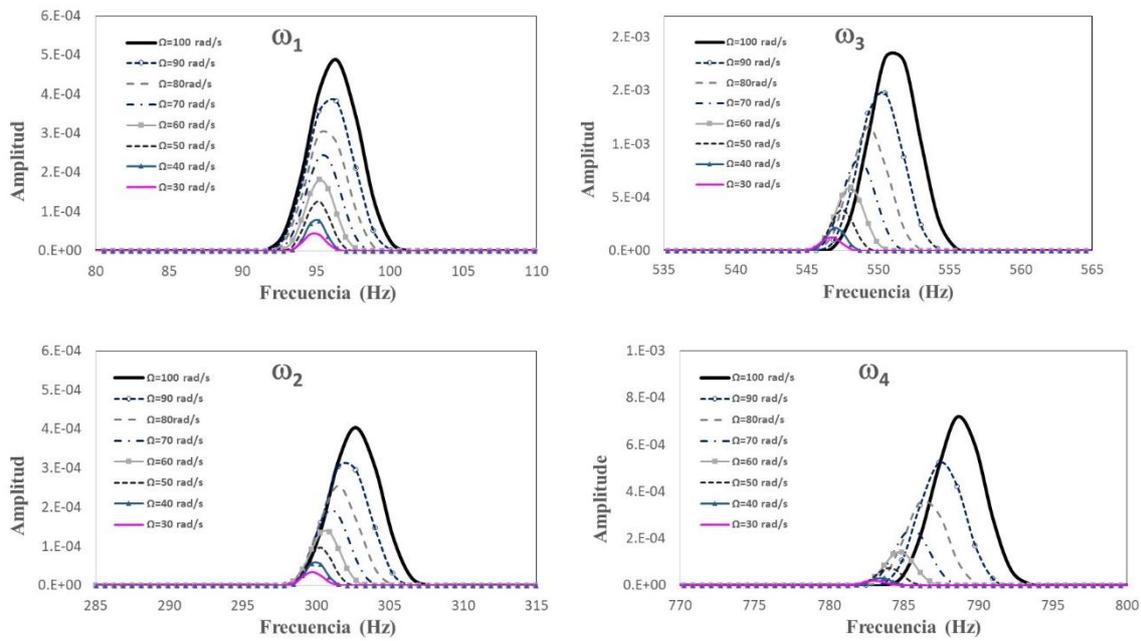


Figura 4: Frecuencias naturales y sus amplitudes para las diferentes velocidades de rotación de una viga intacta.

En segundo lugar, para analizar la influencia del tamaño y la ubicación de la discontinuidad, se ha representado la frecuencia en función de la localización de la discontinuidad para los distintos tamaños relativos de la misma. La Figura 5 muestra un ejemplo de los resultados para las cuatro frecuencias naturales y para la velocidad de rotación $\Omega = 100$ rad/s. A la vista de los resultados, que son análogos a los obtenidos para las demás velocidades de rotación, puede concluirse lo siguiente:

- Para todos los casos considerados, la presencia de la discontinuidad transversal reduce el valor de las frecuencias naturales debido a un aumento de la flexibilidad local [11]
- En el caso de la primera frecuencia natural se observa, como era de esperar, que el valor de la frecuencia disminuye a medida que aumenta el tamaño del defecto y el efecto del defecto es menor a medida que aumenta la localización relativa del mismo.
- Para la segunda frecuencia natural se observa el mismo comportamiento con respecto al tamaño, el valor de la frecuencia disminuye con el tamaño. En cuanto a la influencia de la ubicación, para $\xi = 0.14$ se encuentra el mínimo en el valor de la frecuencia para todos los tamaños, luego aumenta hasta $\xi = 0.355$ donde no varía según la severidad del defecto. A partir de ese punto, disminuye a medida que aumenta la localización del defecto hasta $\xi = 0.785$.
- La tercera frecuencia natural también disminuye con el tamaño del defecto. Respecto a la localización del mismo, el mínimo en el valor de la frecuencia se encuentra para todos los tamaños para las localizaciones $\xi = 0.355$ y $\xi = 0.785$, mientras que en $\xi = 0.57$ la frecuencia apenas varía en función de la severidad del defecto.
- Por último, para la cuarta frecuencia natural, la frecuencia también disminuye con el tamaño del defecto. Se observa que esta frecuencia es la más afectada por las variaciones del tamaño de las discontinuidades transversales. Con respecto a la ubicación del defecto, el mínimo en el valor de la frecuencia para todos los tamaños se encuentra en la ubicación $\xi = 0.57$. En las localizaciones $\xi = 0.14$ y $\xi = 0.785$ la frecuencia prácticamente no varía con el tamaño de la discontinuidad.

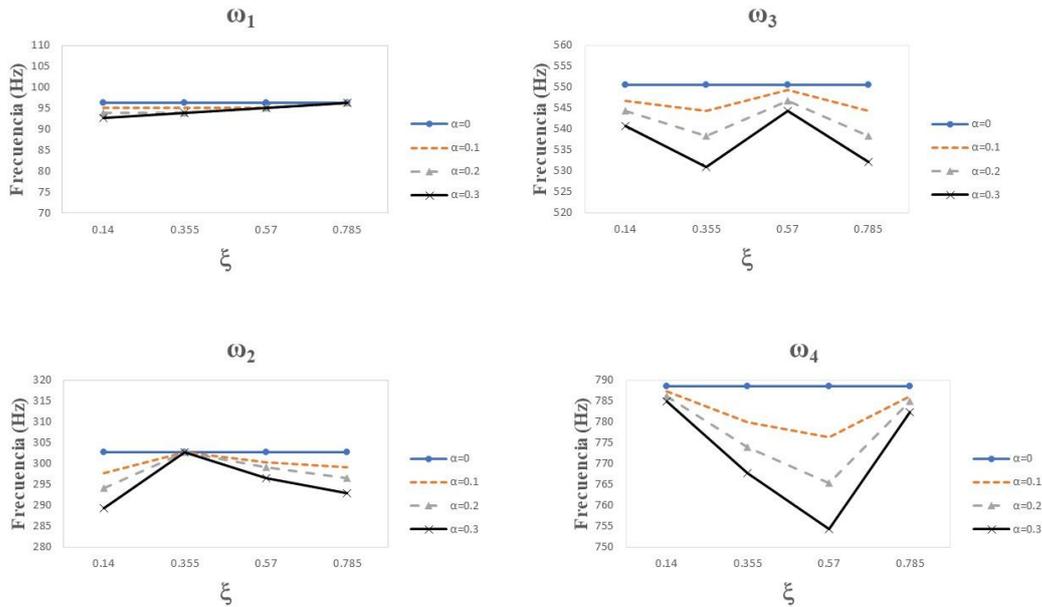


Figura 5: Frecuencias naturales en función de la posición relativa de la discontinuidad para los diferentes tamaños de la discontinuidad y para la velocidad de rotación $\Omega = 100$ rad/s.

3. Aplicación de la RNA

Las RNAs son una herramienta matemática versátil que ha demostrado ser efectiva en la resolución de diversos problemas de ingeniería, entre otras aplicaciones. Su utilidad radica en su capacidad para identificar patrones y relaciones entre datos de entrada y salida. Estas redes buscan imitar el funcionamiento de los sistemas neuronales biológicos y están formadas por unidades denominadas neuronas. Cada neurona recibe múltiples entradas (I_i), que pueden provenir de fuentes externas o de otras neuronas dentro de la red. Luego, combina estas entradas y genera una salida (O) se determina mediante una función de activación aplicada al resultado de la suma ponderada de todas las entradas, es decir, cada entrada (I_i) se multiplica por un peso asociado (w_i), y a este sumatorio se le añade un valor de sesgo (b) (ver Figura 6). De esta manera, la relación matemática entre las entradas y la salida se expresa como:

$$O = f(\sum w_i \cdot I_i + b) \tag{1}$$

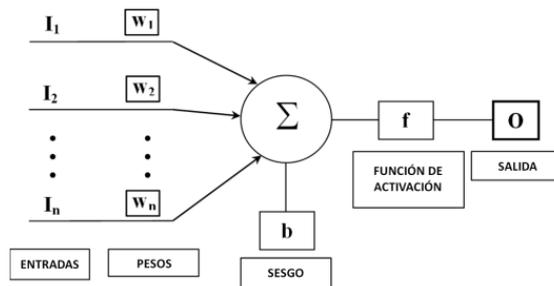


Figura 6: Esquema de una neurona

En este trabajo se ha empleado una Red Perceptrón Multicapa (MLP). Este tipo de red neuronal está compuesta por una capa de entrada, una o varias capas ocultas y una capa de salida. Por lo general, cada neurona de una capa se conecta con todas las neuronas de la siguiente capa. El proceso comienza con el entrenamiento de la red, utilizando un conjunto de datos conocidos como patrones de entrenamiento. Durante esta fase, los patrones se procesan repetidamente, ajustando progresivamente los pesos de las conexiones hasta alcanzar un conjunto óptimo que genere respuestas satisfactorias. En este caso, se ha optado por el algoritmo de retropropagación para el entrenamiento, ya que es el más utilizado en redes MLP debido a su simplicidad y eficacia. Los datos disponibles se han dividido aleatoriamente en 3 grupos, utilizados para el entrenamiento, la validación y la prueba de la red, que constan del 70%, 15% y 15% de los datos, respectivamente. Hay cuatro entradas (tamaño del defecto, localización del mismo, velocidad de giro y orden de frecuencia) y una salida (frecuencia natural).

Las variables utilizadas para comprobar la precisión de la red han sido el error cuadrático medio (ECM), calculado según la expresión (2) y el coeficiente de correlación R^2 . Los mejores resultados se han obtenido con una red con una capa oculta, con 35 neuronas con un error cuadrático medio $ECM = 2.02 \cdot 10^{-6}$ y un coeficiente de correlación $R^2 = 0.99$.

$$ECM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i^{est} - y_i)^2 \quad (2)$$

4. Validación de la RNA

4.1. Comparación con los datos numéricos de referencia

La validación del método propuesto se ha realizado comparando en primer lugar los resultados obtenidos con los datos numéricos de referencia. En la Figura 7 se muestran los ejemplos de la comparación entre los resultados de la red propuesta y los datos numéricos de referencia para la primera y la tercera frecuencia natural y para las localizaciones de la discontinuidad $\xi = 0.14$ y 0.785 . Se han representado los valores de la frecuencia en función del tamaño del defecto para las velocidades de rotación $\Omega = 30$ y 90 rad/s. Se puede observar que la concordancia entre los resultados obtenidos por la red y los numéricos es muy buena. Los resultados de la comparación correspondientes a otras localizaciones y velocidades de giro son muy similares. Además, se ha calculado el Error Relativo Medio (ERM) entre los resultados obtenidos con la red y los datos de referencia, de acuerdo a la ecuación (3). Teniendo en cuenta todos los casos considerados, el error obtenido es del 2%.

$$ERM(\%) = 100 \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i^{est} - y_i}{y_i^{est}} \right| \quad (3)$$

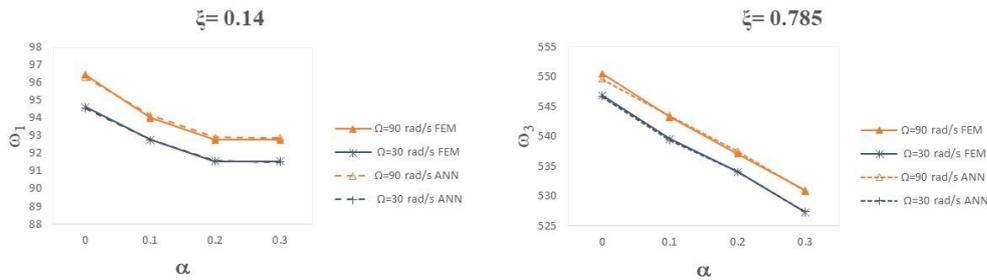


Figura 7: Frecuencias naturales en función de la posición relativa de la discontinuidad para los diferentes tamaños de la discontinuidad y para la velocidad de rotación $\Omega = 100$ rad/s.

4.2. Comparación con valores no utilizados en el entrenamiento de la red

En segundo lugar, para comprobar la robustez y precisión de la RNA propuesta, se han seleccionado aleatoriamente dos casos de vigas con características diferentes a las utilizadas para su entrenamiento y se han calculado las cuatro frecuencias para cada caso. En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos. Como puede observarse, el error es pequeño, en ninguno de los casos el error es superior al 4,5 %.

Tabla 2: Comparación con valores no utilizados en el entrenamiento de la RNA.

Ω (rad/s)	ξ	α	Orden de la frecuencia	ω_{num}	ω_{est}	Error (%)
96	0.635	0.1	1	95.21	95.57	0.38
			2	299.07	299.66	0.19
			3	550.54	542.84	1.39
			4	776.37	784.26	1.02
67	0.405	0.3	1	92.77	93.22	0.49
			2	301.51	301.19	0.11
			3	521.24	534.79	2.60
			4	780.03	746.44	4.30

5. Conclusiones

En este trabajo se ha desarrollado una metodología, basada en RNAs, que estima los valores de las cuatro primeras frecuencias naturales de vigas de material compuesto con pieles de polímeros reforzados con fibra de carbono y núcleo de nido de abeja dañada en función de la velocidad de rotación, el tamaño y la localización del defecto. Los datos necesarios para entrenar la RNA se han obtenido a partir de un modelo numérico dinámico 3D de una viga sándwich con una discontinuidad transversal en el núcleo. La metodología propuesta ofrece muy buenos resultados. Si los valores estimados por la red se comparan con los datos utilizados para la formulación de la red, el error relativo medio es del 2%. Si la comparación se realiza con valores obtenidos del modelo numérico, diferentes a los utilizados en la elaboración de la red, la estimación, como era de esperar, es ligeramente peor, pero en ningún caso supera el 4,5%. Por tanto, la RNA propuesta representa una alternativa altamente efectiva para analizar la respuesta vibratoria de vigas sándwich dañadas, destacándose por su eficiencia, facilidad de uso y bajo costo computacional.

6. Referencias

- [1] Chen L. W., Chen C. L., “Vibration and stability of crack thick rotating blades”, *Computers Structures* **28**, 67–74 (1988)
- [2] Kim S. S., Kim J. H., “Rotating composite beam with a breathing crack”, *Composite Structures* **60**, 83–90 (2003)
- [3] Ozdemir O., Kaya M. O., “Energy Derivation and Extension-Flapwise Bending Vibration Analysis of a Rotating Piezo-laminated Composite Timoshenko Beam”. *Mechanics of Advanced Materials and Structures* **21**, 477-489 (2014)
- [4] Lee J. W., Lee J. Y., “In-plane bending vibration analysis of a rotating beam with multiple edge cracks by using the transfer matrix method”, *Meccanica* **52**, 1143–1157 (2017)
- [5] Valverde-Marcos B., Muñoz Abella B., Rubio L., Rubio P., “Influence of the rotation speed on the dynamic behaviour of a cracked rotating beam”. *Theoretical and applied fracture mechanics* **117**, 103209 (2022)
- [6] Sezgin E. F., “Mechanical Behaviour and Modeling of Honeycomb Cored Laminated Fiber/Polymer Sandwich Structures”, *Thesis (Master), Izmir Institute of Technology* (2008).
- [7] Marsh G., “Wind turbines. How big can they get?” *Refocus* **6 (2)**, 22–28 (2005)
- [8] Sekhar A., “Multiple cracks effects and identification”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, **22**, 845–878 (2008),
- [9] Youngho K., Junyoung J., Wanjo R., Dong-Whan C., “Multiple defect diagnostics of gas turbine engine using svm and rcga-based ann algorithms”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, **26 (5)**, 1623–1632 (2012)
- [10] Ridgard C., “Complex Structures for Manned/ Unmanned Aerial Vehicles. Delivery Order 0019: Low Temp Composite Processing Mechanical Property Data”. *Air Force Research Laboratory* (2008).
- [11] Honeycomb Core & Flex-Core Material & Manufacturers. <https://www.toraytac.com/products/adhesives-and-core/honeycomb-core> (acceso: 17 de julio de 2022).
- [12] ABAQUS, Abaqus theory manual, version 6.7, in: Dassault Systemes Inc (2007).
- [13] Rubio P., Ivañez I., Ivaylov V., Muñoz Abella B., Rubio L., “Comportamiento vibratorio de vigas de material compuesto dañadas”. *Anales de Ingeniería Mecánica* (2023).
- [14] Dimarogonas A.D., “Vibration of cracked structures: A state of the art review”. *Engineering Fracture Mechanics* **55 (5)**, 831-857 (1996).