

Monitoreo de la Salud Estructural de un Puente Peatonal

José A. García Briones¹, Dr. Arturo García-Pérez²

¹División de Ciencias e Ingenierías del Campus León, ²División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato

ja.garciabriones@ugto.mx¹, arturo@ugto.mx²

Resumen

Este trabajo propone el uso del algoritmo ESPRIT (Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques) para el monitoreo de salud estructural (SHM) en puentes peatonales colgantes, demostrando su superioridad sobre métodos tradicionales en la detección de fallas tempranas. El objetivo del monitoreo de la salud estructural es prevenir fallos catastróficos como el colapso del puente de Nepal, evitando pérdidas monetarias y sobre todo humanas, lo que puede provocar aislamiento comunitario. Se demostró que métodos tradicionales (Transformada de Fourier, Wavelet) no identifican fallas sutiles como desplazamientos de frecuencia, modulación de fase o transitorios periódicos. Se evaluó la eficacia de ESPRIT mediante el análisis de señales sintéticas simulando 3 fallas: Falla 1: Desplazamiento en frecuencias modales (ej. corrosión de cables). Falla 2: Modulación de fase lenta (holguras en conexiones). Falla 3: Componentes transitorias periódicas (impactos por juntas desgastadas). Estas simulaciones fueron realizadas con base en las ecuaciones propuestas en (Luleci et al., 2022). Los resultados demuestran que la transformada de Fourier y Wavelet fallan en detectar las 3 fallas (baja resolución, enmascaramiento de señales), mientras que ESPRIT identifica con precisión todas las fallas examinadas, incluyendo: frecuencias cercanas (ej. 1.25 Hz vs. 1.27 Hz en Falla 1); componentes de baja energía (ej. transitorios a 15 Hz en Falla 3) y distorsiones de fase (Falla 2). ESPRIT constituye una solución robusta para SHM, ofreciendo alta resolución espectral y bajo costo (usa un solo sensor piezoeléctrico), permitiendo implementar mantenimiento preventivo que garantice la seguridad de infraestructuras críticas.

Palabras clave: vibraciones; monitoreo de fallas en estructuras, análisis espectral, ESPRIT.

Introducción

La infraestructura de puentes peatonales colgantes, comúnmente utilizados en zonas rurales y urbanas con obstáculos naturales o viales, representa un componente crítico para garantizar la movilidad segura de las comunidades. La detección temprana de fallas en estos puentes es esencial, ya que su diseño ligero y flexible los hace susceptibles a degradación progresiva y repentina. Entre los principales problemas se encuentran la corrosión de cables principales y suspendidos, el desgaste o pudrición de los elementos de madera o concreto, la pérdida de tensión en cables de anclaje, y el daño inducido por sobrecargas, viento o eventos sísmicos.

En términos sociales, la falla de un puente peatonal colgante puede aislar comunidades completas, interrumpiendo el acceso a educación, salud y comercio. Por ejemplo, en 2021 colapsó un puente peatonal colgante en **Cuernavaca, México**, durante su inauguración, dejando más de 20 heridos debido al deterioro no atendido y errores en la rehabilitación (Suárez et al., 2022). Otro caso crítico ocurrió en 2020 en **Nepal**, cuando el colapso de un puente colgante dejó incomunicados a más de 1000 habitantes tras las lluvias monzónicas (The Himalayan Times, 2025).

La detección de fallas mediante inspección visual presenta limitaciones importantes, ya que microfisuras, corrosión interna o pérdida de tensado no son perceptibles a simple vista. Por ello, actualmente se impulsa la aplicación de técnicas de monitoreo estructural como análisis modal, instrumentación con sensores de deformación, vibración y temperatura, inspecciones periódicas con drones y fotogrametría, y análisis de imágenes basados en inteligencia artificial (Comanducci et al., 2015), (Zhang et al., 2024b). Estas estrategias permiten planificar mantenimientos preventivos y evitar daños catastróficos.

Fundamentos Teóricos

En esta se presentan en forma breve los conceptos y definiciones matemáticas utilizados en el método propuesto para la identificación de la frecuencia de fallo en un puente peatonal.

El análisis de vibraciones en puentes peatonales colgantes es esencial para garantizar su seguridad estructural y funcionalidad. Estos puentes poseen una configuración flexible que los hace susceptibles a vibraciones inducidas por el viento, el tránsito peatonal y otros eventos dinámicos. El monitoreo y estudio de su comportamiento vibratorio permite detectar fallas, determinar su integridad y planificar mantenimientos preventivos.

- **Modelado dinámico de puentes peatonales colgantes**

Desde el punto de vista de la dinámica estructural, un puente peatonal colgante puede modelarse como un sistema con múltiples grados de libertad (MDOF), donde su ecuación de movimiento se expresa como (Chopra, 2017):

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = F(t) \text{ donde:} \quad (1)$$

M es la matriz de masa, C es la matriz de amortiguamiento, K es la matriz de rigidez, $x(t)$ es el vector de desplazamiento, y $F(t)$ es el vector de fuerzas externas (vientos, peatones, sismos, etc.).

El sistema presenta frecuencias naturales y modos propios, que definen su comportamiento dinámico. La frecuencia natural fundamental se asocia con la rigidez y masa globales, mientras que los modos superiores representan patrones de deformación más complejos.

- **Frecuencias naturales y resonancia**

La determinación de frecuencias naturales es crucial para evitar resonancias. Las frecuencias naturales dependen principalmente de: la tensión inicial de los cables principales, la rigidez y masa del tablero, la configuración geométrica del puente (luz, flecha, distribución de cables suspendidos). Si una carga excitadora, como el paso rítmico de peatones o ráfagas de viento, coincide con una frecuencia natural del puente, puede producirse un fenómeno de resonancia, amplificando las vibraciones y provocando fatiga estructural o colapso, como sucedió en el histórico colapso del puente colgante Tacoma Narrows en 1940.

- **Amortiguamiento estructural**

El amortiguamiento es el mecanismo mediante el cual se disipa energía vibratoria en el puente. Generalmente, los puentes colgantes presentan bajo amortiguamiento estructural, lo cual incrementa su susceptibilidad a oscilaciones prolongadas. Se modela frecuentemente mediante amortiguamiento de Rayleigh, proporcional a la masa y rigidez.

• Monitoreo de vibraciones y detección de fallas

El análisis de vibraciones es también una herramienta clave para la detección de daños estructurales. Mediante técnicas como:

- Análisis modal experimental (EMA):** Obtención de frecuencias naturales y formas modales con excitación controlada.
- Identificación modal operativa (OMA):** Determinación de parámetros modales bajo excitaciones ambientales.
- Métodos de cambio modal:** Comparación de frecuencias naturales y modos propios a lo largo del tiempo para detectar reducciones de rigidez asociadas a daños en cables, conexiones o el tablero.

Una disminución en la frecuencia natural indica pérdida de rigidez, mientras que cambios en las formas modales pueden evidenciar localización del daño.

El análisis de vibraciones no solo previene fallas catastróficas, sino que también optimiza el diseño, proponiendo refuerzos, amortiguadores o cambios geométricos para mitigar oscilaciones excesivas. Además, constituye la base para sistemas de monitoreo estructural de largo plazo (SHM) utilizados en la gestión inteligente de puentes (Fuentes et al., 2022), (Deng et al., 2023).

En puentes colgantes, los modos de vibración críticos son:

- **Modo vertical:** Sensible a cargas peatonales.
- **Modo torsional:** Causante de inestabilidades aerodinámicas.
- **Modo lateral:** Riesgo en vientos cruzados.

A continuación, se presenta una comparación de las diferentes técnicas de monitoreo, aplicaciones y desventajas respectivamente.

• Técnicas de Monitoreo de Frecuencias y sus Desventajas

La Tabla 1 muestra una comparación de diferentes técnicas aplicadas al monitoreo de puentes peatonales colgantes, indicando sus ventajas y desventajas respectivamente.

Técnica	Aplicación	Desventajas vs. Otras Técnicas
OMA (Operational Modal Analysis)	Identifica modos usando vibraciones ambientales (viento, pasos) (Brincker, 2001).	Requiere alta densidad de sensores (>20 puntos). Menor precisión en frecuencias > 20 Hz (Peeters, 2000).
Sensores FBG (Fibra Óptica)	Mide deformaciones en cables/anclajes con precisión de $\pm 0.1\%$ (Li et al., 2015).	Costo elevado (USD \$5,000 por sensor). Vulnerable a daños físicos.
Acelerómetros MEMS	Redes inalámbricas para monitoreo continuo (Dabbous et al., 2024).	Baja resolución en bajas frecuencias (<1 Hz). Deriva térmica.
Radar Interferométrico	Monitoreo remoto de desplazamientos (Gentile & Bernardini, 2009).	Limita la detección de daños locales. Resolución de 0.1 mm insuficiente para microfisuras.

Técnica	Aplicación	Desventajas vs. Otras Técnicas
Drones con LIDAR	Escaneo 3D para modelos BIM (Kavaliauskas et al., 2022).	Dependencia de condiciones climáticas. Precisión insuficiente para vibraciones en tiempo real.

La Tabla 1 presenta diferentes técnicas usadas en la actualidad para el monitoreo estructural. Se observa que cada técnica presenta ventajas y limitaciones específicas. En este estudio se analizan las vibraciones obtenidas con un acelerómetro piezoeléctrico, que, a pesar de tener algunas desventajas, es uno de los sensores más utilizados en la actualidad para monitoreo de estructuras metálicas y de concreto.

• Importancia del Monitoreo Continuo

El monitoreo continuo de las estructuras es fundamental para la identificación temprana de fallas, permitiendo realizar mantenimiento preventivo y correctivo, con la finalidad de evitar desastres que pueden causar pérdidas monetarias o peor aún, la pérdida de vidas humanas. Las características principales del monitoreo continuo son:

- Seguridad:** El *London Millennium Bridge* (2000) mostró resonancia peligrosa a 0.8 Hz por sincronización de pasos (Dallard, 2005).
- Vida útil:** Un cambio del 8% en f_n predice reducción del 30% en vida residual (Whelan et al., 2010). Otros estudios posteriores que validan el modelo anterior fueron el de confirmación en 12 puentes metálicos con error medio: 4.5% (Rabi et al., 2024), (Capacci et al., 2022).
- Costos:** Monitoreo automático reduce inspecciones manuales en 70%, con ROI de 2 años (Boix-Cots et al., 2023).

Actualmente existe monitoreo continuo sobre diferentes estructuras, puentes vehiculares y puentes peatonales en diversas partes del mundo, con el objetivo de garantizar su buen funcionamiento y la seguridad de las personas que los utilizan. Como ejemplos representativos se presentan:

• Casos de Estudio

- Puente de Capilano (Canadá):** Sistema FBG detectó corrosión en cables con un 12% de caída en f_1 (Golovastikov et al., 2025).
- Puente peatonal en Nepal:** Colapso (2021) asociado a falta de monitoreo de frecuencias torsionales (Manish, 2021).

Cuando las fallas son graves es necesario sacar de operación el puente y hacer las reparaciones necesarias para que el puente vuelva a ser funcional nuevamente. En el caso del puente peatonal de Nepal, la falta de monitoreo llevó a su colapso con pérdidas humanas y varios heridos. Investigaciones preliminares señalaron que el colapso se debió a sobrecarga (había alrededor de 30 personas cruzando al mismo tiempo) y posible deterioro estructural en un puente antiguo. Además, se informó que el puente estaba en mantenimiento, pero los trabajos aún no habían concluido y a pesar de eso las personas lo usaron con las consecuencias mencionadas anteriormente. Esto evidencia la importancia del monitoreo continuo de todo tipo de estructuras para seguridad de los usuarios y el correcto funcionamiento de las mismas.

• Método ESPRIT para el monitoreo e identificación de fallas en puentes colgantes

ESPRIT es un algoritmo avanzado para estimación de frecuencias y significa: Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques (Estimación de parámetros de la señal usando técnicas de invarianza rotacional). ESPRIT identifica frecuencias muy cercanas con gran precisión, funciona incluso cuando FFT no

puede distinguirlas, es rápido y no requiere un escaneo exhaustivo de frecuencias como el método de alta resolución MUSIC (multiple signal classification).

ESPRIT se aplica a una sola señal de un sensor piezoeléctrico (acelerómetro) usando una técnica llamada "desplazamiento temporal" (Time-ESPRIT). El funcionamiento del método es el siguiente::

Se tiene una señal temporal $x(t)$ del acelerómetro en el puente peatonal. La señal contiene:

- Componentes periódicas: Frecuencia natural del puente (f_1) y sus armónicos.
- Ruido: Paso de peatones (impulsos aleatorios) + viento (ruido de baja frecuencia).

El proceso se inicia con:

1. Crear "sensores virtuales" mediante desplazamiento:

- Se toma la señal completa de N muestras:
 $x = [x(1), x(2), \dots, x(N)]$ (2)
- Se divide esta señal en dos subseñales desplazadas 1 muestra:
 - Subseñal 1 (Grupo A): $X_1 = [x(1), x(2), \dots, x(N-1)]$ (3)
 - Subseñal 2 (Grupo B): $X_2 = [x(2), x(3), \dots, x(N)]$ (4)

Esto simula dos "sensores virtuales" con una muestra de diferencia temporal.

2. Construir matrices de Hankel (o de covarianza):

- Se organiza cada subseñal en una matriz $M \times L$ (donde M es el tamaño de ventana):

$$x_1 = \begin{bmatrix} x(1) & x(2) & \cdots & x(L) \\ x(2) & x(3) & \cdots & x(L+1) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x(M) & x(M+1) & \cdots & x(N-1) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$x_2 = \begin{bmatrix} x(2) & x(3) & \cdots & x(L) \\ x(3) & x(4) & \cdots & x(L+2) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x(M+1) & x(M+2) & \cdots & x(N) \end{bmatrix}$$

- M se elige para capturar la dinámica de las vibraciones (típicamente $M > 2p$, donde p = número de frecuencias a estimar).

3. Descomposición en subespacios (SVD):

- Se apilan las matrices:

$$U_s = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

U_s es la matriz de subespacio de señal obtenida de la descomposición en valores singulares (SVD) de la matriz Hankel construida a partir de la señal.

A continuación

1. Se realiza la SVD de la matriz Hankel de la señal: $X=USV^H$
2. Se toman U_s (los primeros k vectores singulares) como el subespacio de la señal.
3. Se divide U_s en:
 - U_1 : filas 1 a M-1
 - U_2 : filas 2 a M

$$4. \text{ Se calcula: } \Phi = (U_1^\dagger)U_2 \quad (7)$$

donde $\dagger$ es la pseudoinversa y H indica la hermitiana de la matriz.

5. Los eigenvalores de Φ contienen la información de frecuencia en la señal $x(t)$:

$$f_i = \frac{\text{ángulo}(\lambda_i)}{2\pi} \cdot f_s$$

f_s es la frecuencia de muestreo de la señal.

Dividir U_s en U_1 y U_2 permite comparar la señal original y su versión desplazada, para calcular el “ángulo de rotación”, que se traduce directamente en la frecuencia de cada componente de la señal $x(t)$.

Resultados de la realización experimental 1

Inicialmente se generaron dos señales sintéticas de vibraciones que simularan un puente peatonal sano con tres frecuencias modales y ruido ambiental (paso de los peatones y viento) (Luleci et al., 2022) y una señal con una falla en la primera frecuencia modal, que puede deberse a pérdida de tensión en cables, ya sea por corrosión, deslizamiento en anclajes, o fatiga en cables principales/suspendidos. Para simular condiciones más realistas, la falla ocurre después de 50 s de monitoreo. En la figura 1(a), se observa la señal sana y en la figura 1(b) se muestra la señal con la falla incluida. Estas señales se analizarán usando métodos tradicionales de análisis espectral (Transformada de Fourier y Transformada Wavelet) y el método propuesto ESPRIT (Hamza & Buckley, 2024).

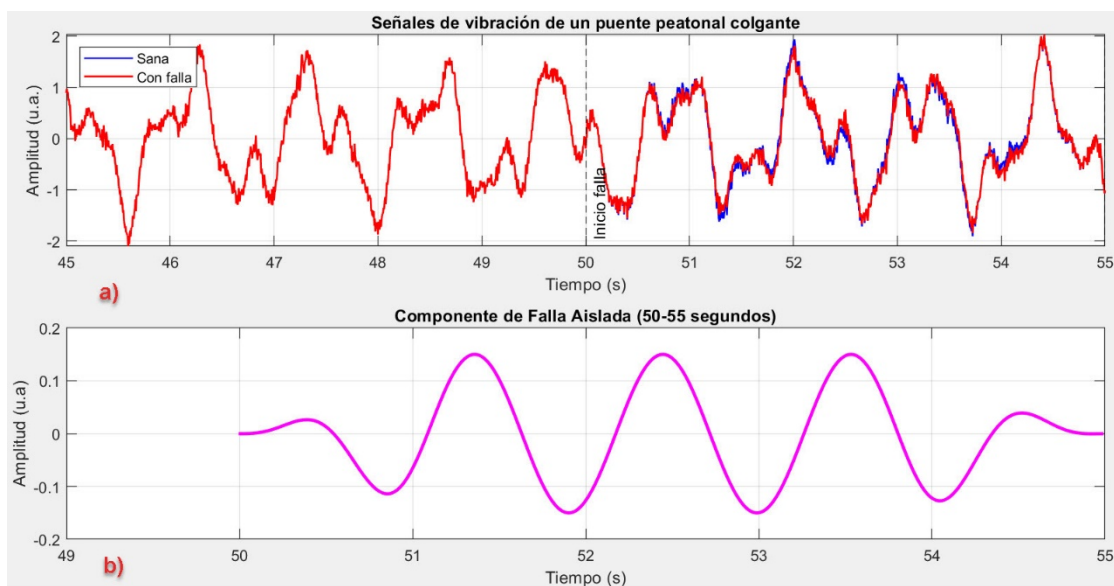


Fig. 1 (a) Señal sintética de un puente colgante sano y (b) señal de falla introducida a partir de los 50 s.

La figura 2 muestra el análisis con la transformada de Fourier, donde se observa en la figura 2a el análisis espectral completo de la señal sana y con falla. Se puede apreciar que ambos espectros son idénticos y no se detecta la señal con falla. En la figura 2b se realiza un zoom alrededor de la primera frecuencia modal (0.86 Hz) y no se puede detectar la falla presente en 0.92 Hz, indicando que esta transformada no es adecuada para identificar este tipo de falla, principalmente porque las fallas iniciales tienen una magnitud pequeña en comparación con las frecuencias modales.

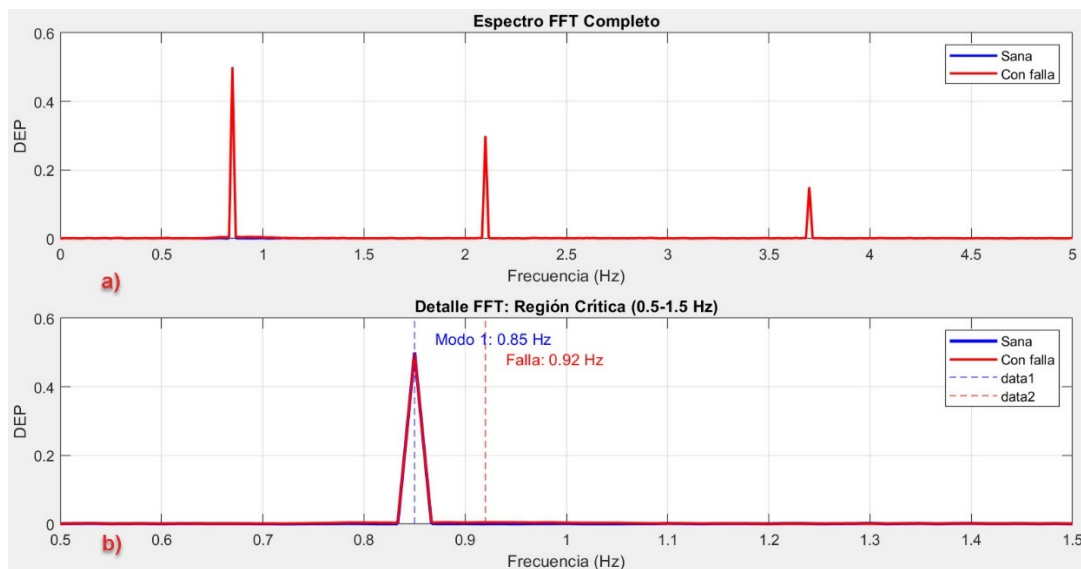


Fig. 2 Espectros obtenidos con la transformada de Fourier en la señal sana y con falla (a), y en b) zoom alrededor de la primera frecuencia modal en 0.85 Hz y donde no puede ser identificada la frecuencia de falla introducida.

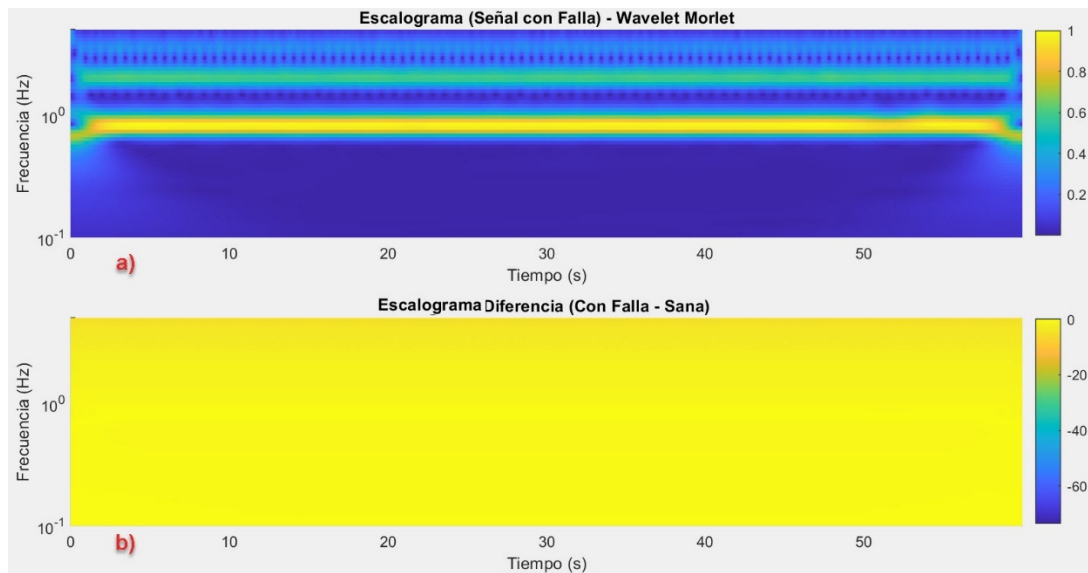


Fig. 3: Transformada Wavelet de ambas señales, sana y con defecto (a), y en b) diferencia entre espectros sano y con falla.

La figura 3 muestra el espectro obtenido al aplicar la transformada Wavelet a ambas señales sana y con defecto, donde no se puede visualizar la frecuencia de la falla. Con el objetivo de detectar un cambio a partir de los 50 s, momento en que se agregó la señal de falla, se calcula la diferencia de ambos espectros (sano y con falla) y no se observa ningún cambio en todo el rango del espectro, por lo que la transformada Wavelet no fue apta para identificar la falla.

A continuación se analiza otro caso de estudio de una señal de vibraciones de un puente peatonal más realista que representa situaciones de la vida real en los puentes peatonales colgantes, donde típicamente se encuentran múltiples fallas simultáneas en este tipo de estructuras. Para ello se consideran 3 tipos de fallas:

- Fallo 1: Desplazamiento en la primera frecuencia modal, que puede deberse a la corrosión o rotura de cables principales (reduce tensión $\rightarrow$ baja/sube frecuencia natural).
- Falla 2: Modulación de fase lenta, que puede deberse a holguras en conexiones (grietas en soldaduras, pernos flojos en anclajes de cables o juntas entre el paso peatonal y las torres que sostienen el puente) o ráfagas de viento que excitan modos transversales/torsionales, modificando la fase de la vibración principal.
- Falla 3: Componentes transitorias periódicas, que pueden deberse a juntas desgastadas, pernos flojos o rozamiento cíclico en elementos como: anclajes de cables (ej.: placas de sujeción corroídas). Apoyos del tablero (deslizamiento no uniforme). La firma en vibraciones se caracteriza por picos agudos ("spikes") repetidos en el dominio del tiempo, sincronizados con la carga peatonal o el viento.

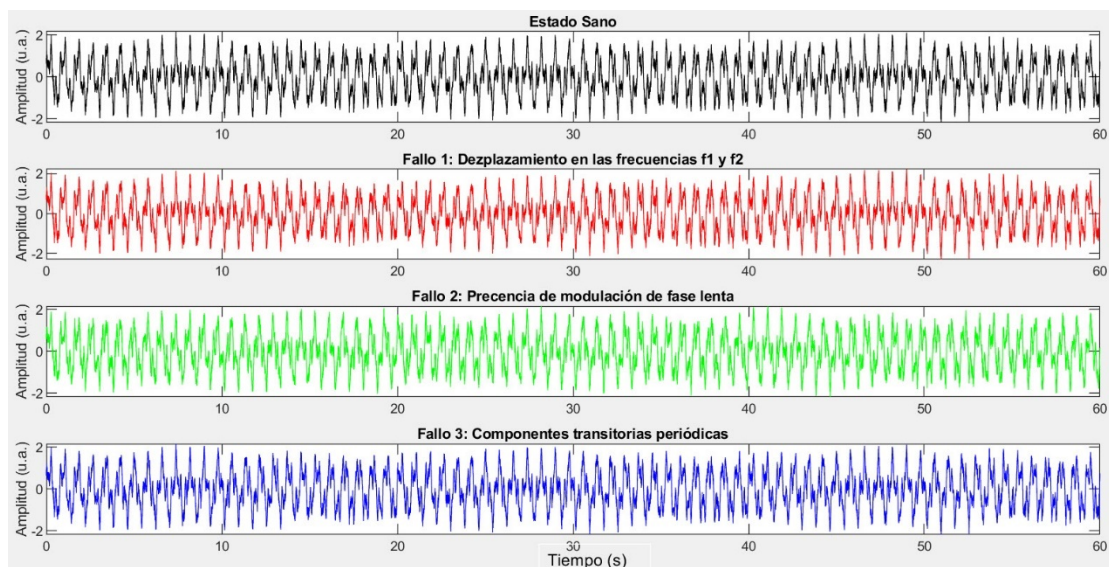


Figura 4: Señales de vibraciones de un puente peatonal sano y con los 3 tipos de fallas descritos anteriormente.

En la figura 4, al comparar la señal sana con las tres señales con fallas, es difícil distinguir alguna anomalía en el dominio del tiempo, lo que resalta la importancia de realizar un análisis en el dominio de la frecuencia.

La figura 5 muestra los espectros de la señal sana, la cual tiene las tres frecuencias modales ubicadas en: 1.25 Hz, 3.8 Hz y 7.45 Hz, y que se detectan sin ningún problema. El espectro del fallo 1 no puede identificar las frecuencias de falla (1.27 Hz y 3.78 Hz) cercanas a las primeras dos frecuencias modales y solo muestra las mismas 3 frecuencias modales. El espectro de la falla 2 indica la misma frecuencia modal de la señal sana en 1.25 Hz y no muestra componentes adicionales cercanas a esta frecuencia como debería esperarse para la señal de falla 2. El espectro de la falla 3 sigue mostrando las tres frecuencias modales de la señal sana y no muestra la componente de la frecuencia de falla localizada en 15 Hz. Por lo tanto, se concluye que la transformada de Fourier no es apta para la identificación de ninguno de los tres fallos en esta señal de vibraciones del puente peatonal colgante. A continuación, se presenta el espectro obtenido mediante la aplicación de la transformada Wavelet.

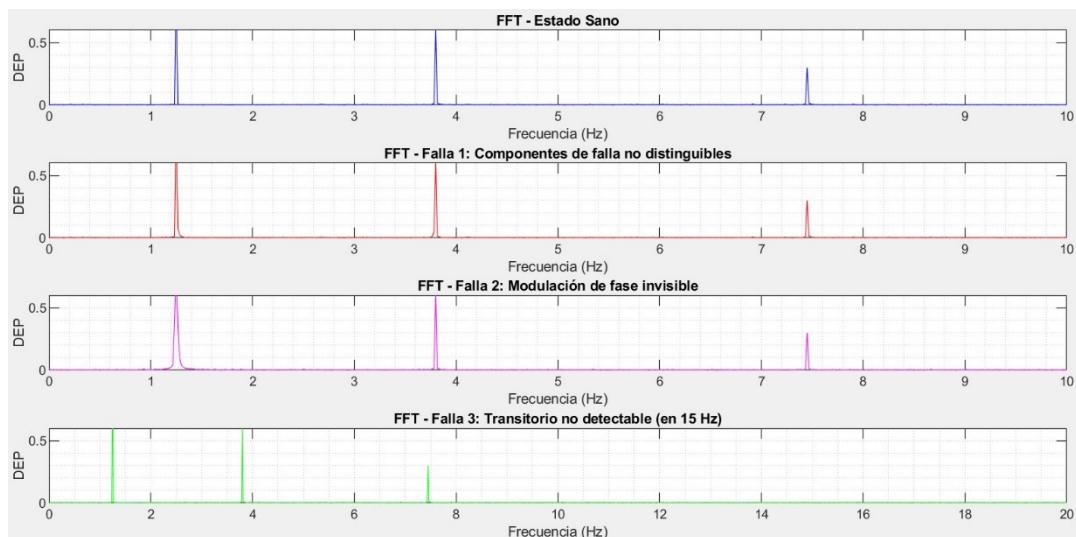


Figura 5: Espectros obtenidos con la transformada de Fourier de la señal sana, así como los espectros obtenidos para los 3 tipos de fallos.

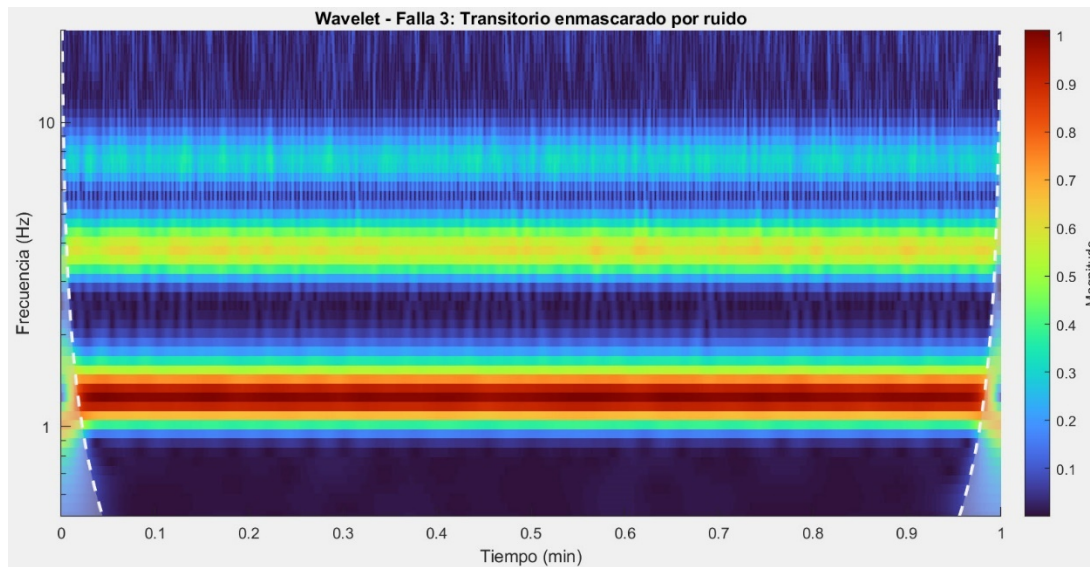


Figura 6: Espectros obtenidos con la transformada de Wavelet de la señal sana, así como el espectro obtenido para la falla 3.

La figura 6 muestra el espectro obtenido con la transformada Wavelet para la identificación de la falla 3 (transitorio en 15 Hz). El espectro muestra una resolución deficiente en frecuencia, con componentes anchos que no permiten distinguir claramente su frecuencia. Es importante notar que el eje de la frecuencia está graficado en coordenadas logarítmicas y en 15 Hz no hay energía detectable. Por lo tanto, la transformada Wavelet tampoco proporciona resultados satisfactorios en la identificación de estos tres fallos.

La figura 7 muestra los espectros de la señal sana y los espectros de los tres fallos usando la transformada ESPRIT. En la figura 7a se observan los tres modos fundamentales de la señal sana en 1.25 Hz, 3.8 Hz y 7.45 Hz consistentes con las frecuencias especificadas para la señal. Es importante mencionar que la transformada ESPRIT es una transformada discreta y que solo se visualizan impulsos en las frecuencias localizadas por el método, y magnitudes acordes con la energía presente en esas frecuencias. La figura 7b muestra el espectro obtenido con la falla tipo 1 donde se observa su efecto en las frecuencias modales 1 y 2 en líneas negras. Aunque no se distingue su presencia adecuadamente a esta escala, la figura 8 presenta un zoom desde 1 Hz a 4 Hz, para identificar las frecuencias de la falla.

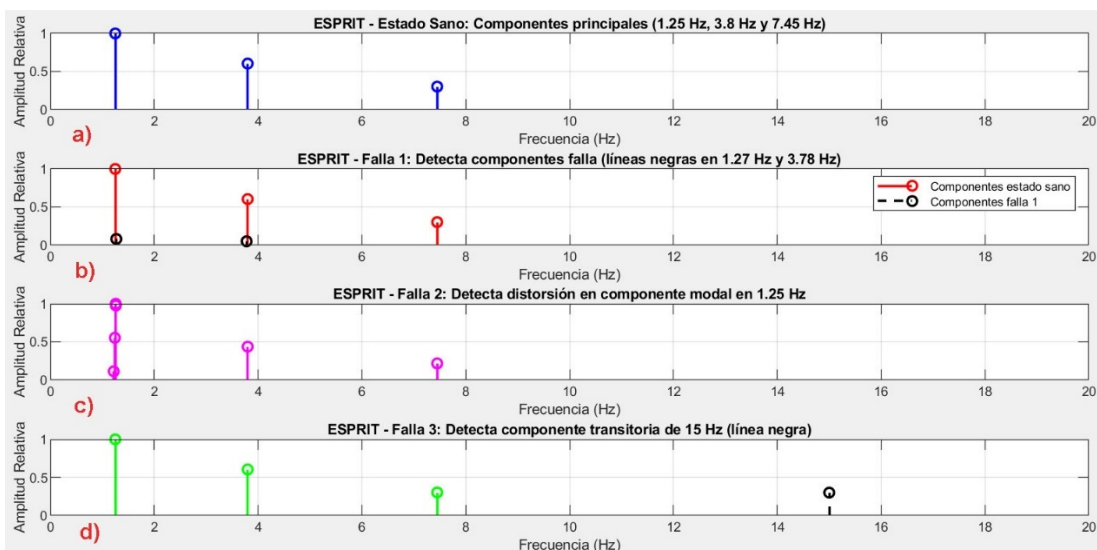


Figura 7: Espectros obtenidos con la transformada ESPRIT de la señal sana, así como los espectros obtenidos para los 3 tipos de fallos.

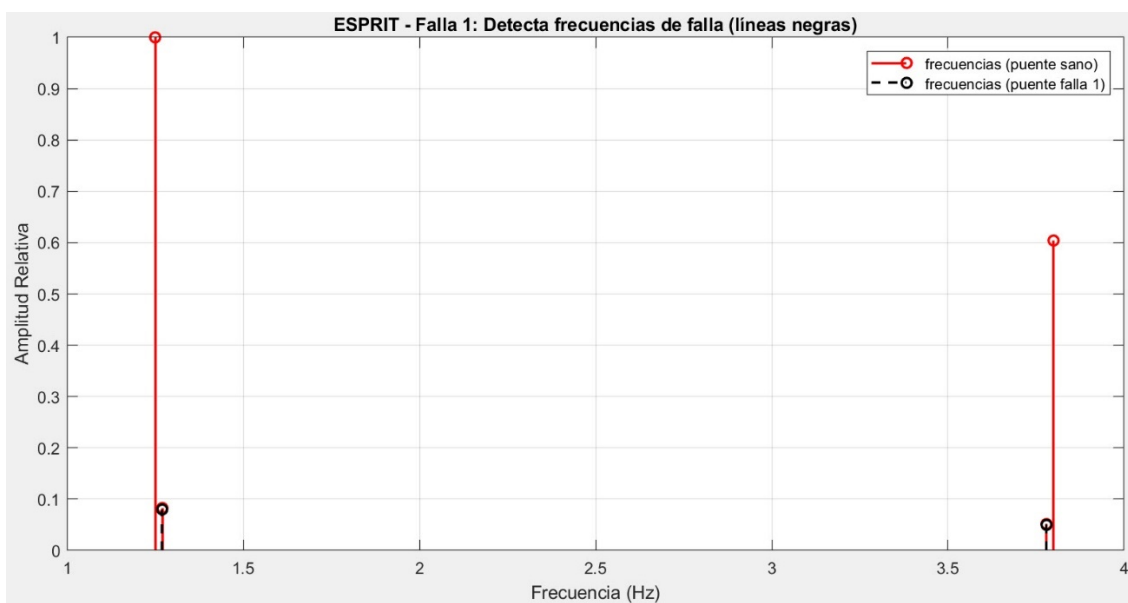


Figura 8: Zoom del espectro obtenido con la transformada ESPRIT de la señal con fallo tipo 1.

En la figura 8 se presenta un zoom del espectro de la señal con falla tipo 1, donde en rojo se visualizan las dos principales frecuencias de la señal sana en 1.25 Hz y 3.8 Hz, y en negro se observa el efecto de la falla 1 sobre estas dos frecuencias de la señal sana. En este caso la falla tipo 1 presenta componentes ubicados en 1.27 Hz y 3.78 Hz. Se destaca que la cantidad de energía presente es mínima, comparada con la magnitud de las componentes sanas, lo que demuestra que la técnica ESPRIT es altamente efectiva para detectar componentes de pequeña magnitud y con frecuencias muy cercanas a las frecuencias modales normales.

En la figura 7 se observa el efecto de la falla 2 sobre la primera frecuencia modal de la señal sana, mostrando la aparición de componentes de diversa magnitud y con diferentes desplazamientos de frecuencia como se muestra en la figura 9. Se aprecia que ya no se observa claramente la primera componente modal en 1.27 Hz, y en su lugar aparecen otras componentes por debajo y por arriba de 1.27 Hz, indicando el efecto del

fallo 2 sobre la primera frecuencia modal de la señal sana. Se identifican dos componentes por debajo de 1.25 Hz, así como 2 componentes por arriba de 1.26 Hz.

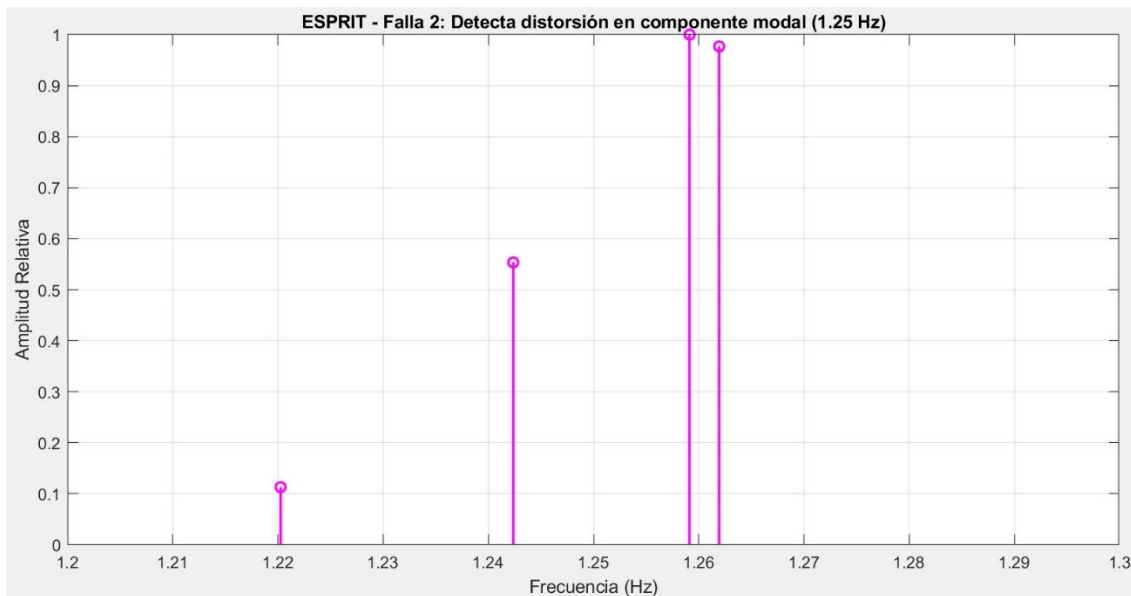


Figura 9: Zoom del espectro obtenido con la transformada ESPRIT de la señal con fallo tipo 2.

En la figura 7d) se observa la aparición de la componente en 15 Hz, que corresponde a la frecuencia transitoria que indica el fallo tipo 3. De igual forma se aprecia que su magnitud no es grande en comparación con las magnitudes de las frecuencias modales de la señal. Esto es un indicativo de una falla inicial, ya que conforme la falla progrese en condiciones reales, la magnitud de esta componente también se incrementaría.

Conclusiones

En esta investigación de monitoreo de la salud estructural de un puente peatonal mediante técnicas de estimación espectral, se verificó que la técnica ESPRIT supera significativamente a las técnicas convencionales. ESPRIT detecta fallas incipientes (ej. microfisuras, holguras) que la transformada de Fourier y Wavelet pasan por alto, gracias a su alta resolución en frecuencia. La técnica mostró excelente sensibilidad a componentes de baja energía, identificando señales débiles (ej. transitorios periódicos) incluso cuando su magnitud es 100 veces menor que las frecuencias modales principales.

ESPRIT demostró efectividad en la detección de tres tipos de fallas críticas: a) Falla 1: Diagnostica reducción de rigidez (corrosión de cables) mediante desplazamientos de frecuencias modales; b) Falla 2: Detecta no linealidades (ej. fricción intermitente) a través de modulación de fase, y c) Falla 3: Captura impactos periódicos asociados a daños locales. Esta capacidad de detección múltiple representa una ventaja significativa sobre métodos tradicionales.

Los resultados obtenidos demuestran que esta técnica es viable para implementación práctica, siendo ideal para monitoreo continuo en puentes remotos debido a su bajo costo y mínimo hardware requerido. El impacto en seguridad es considerable, ya que permite mantenimiento preventivo ante cambios del 5% en frecuencias modales, evitando colapsos potenciales.

Como limitaciones del estudio, se reconoce que las validaciones se realizaron únicamente con señales sintéticas, requiriéndose validación en estructuras reales. Además, el método requiere conocimiento previo del número aproximado de frecuencias modales para configurar adecuadamente los parámetros del algoritmo.

Las líneas futuras de investigación incluyen: a) Implementación y validación en puentes reales con diferentes condiciones ambientales; b) Desarrollo de sistemas autónomos de adquisición y procesamiento en tiempo real; c) Integración con técnicas de inteligencia artificial para predicción de vida útil residual; d) Estudio comparativo con otros métodos de alta resolución como MUSIC y Prony.

Como recomendación final, se propone integrar ESPRIT en sistemas SHM para puentes en zonas vulnerables, complementado con inspecciones físicas periódicas, estableciendo así un protocolo integral de monitoreo que maximice la seguridad estructural y optimice los recursos de mantenimiento.

Referencias

- Boix-Cots, D., Pardo-Bosch, F., & Pujadas, P. (2023). Analysis and Comparison of the Infrastructure Report Cards as a Decision Making Tool for Sustainable Development. *Buildings*, 13(9), 2166. <https://doi.org/10.3390/buildings13092166>.
- Brincker, R., Ventura, C. E., & Andersen, P. (2001). Damping Estimation by Frequency Domain Decomposition. In *Proceedings of IMAC 19: A Conference on Structural Dynamics* : february 5-8, 2001, Hyatt Orlando, Kissimmee, Florida, 2001 (pp. 698-703). Society for Experimental Mechanics.
- Capacci, L., Biondini, F., & Frangopol, D. M. (2022). Resilience of aging structures and infrastructure systems with emphasis on seismic resilience of bridges and road networks: Review. *Resilient Cities And Structures*, 1(2), 23-41. <https://doi.org/10.1016/j.rcns.2022.05.001>.
- Chopra, A. K. (2017). *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering* (5th ed.). Pearson.
- Comanducci, G., Ubertini, F., & Materazzi, A. L. (2015). Structural health monitoring of suspension bridges with features affected by changing wind speed. *Journal Of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics*, 141, 12-26. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.02.007>.
- Dabbous, A., Berta, R., Fresta, M., Ballout, H., Lazzaroni, L., & Bellotti, F. (2024). Bringing Intelligence to the Edge for Structural Health Monitoring: The Case Study of the Z24 Bridge. *IEEE Open Journal Of The Industrial Electronics Society*, 5, 781-794. <https://doi.org/10.1109/ojies.2024.3434341>.
- Dallard, P. (2005). Pedestrian Excitation on the London Millennium Footbridge. *Structures Congress 2019*, 1-13. [https://doi.org/10.1061/40753\(171\)138](https://doi.org/10.1061/40753(171)138).
- Deng, Z., Huang, M., Wan, N., & Zhang, J. (2023). The Current Development of Structural Health Monitoring for Bridges: A Review. *Buildings*, 13(6), 1360. <https://doi.org/10.3390/buildings13061360>.
- Fuentes, R., Cross, E. J., Gardner, P. A., Bull, L. A., Rogers, T. J., Barthorpe, R. J., Shi, H., Dervilis, N., Farrar, C. R., & Worden, K. (2022). Structural Health Monitoring and Damage Identification. En *Springer eBooks* (pp. 989-1061). https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4547-0_23.
- Gentile, C., & Bernardini, G. (2009). An interferometric radar for non-contact measurement of deflections on civil engineering structures: laboratory and full-scale tests. *Structure And Infrastructure Engineering*, 6(5), 521-534. <https://doi.org/10.1080/15732470903068557>.
- Golovastikov, N. V., Kazanskiy, N. L., & Khonina, S. N. (2025). Optical Fiber-Based Structural Health Monitoring: Advancements, Applications, and Integration with Artificial Intelligence for Civil and Urban Infrastructure. *Photonics*, 12(6), 615. <https://doi.org/10.3390/photonics12060615>.
- Hamza, R., & Buckley, K. (1994). Resolution enhanced ESPRIT. *IEEE Transactions On Signal Processing*, 42(3), 688-691. <https://doi.org/10.1109/78.277867>.
- Kavaliauskas, P., Fernandez, J. B., McGuinness, K., & Jurelionis, A. (2022). Automation of Construction Progress Monitoring by Integrating 3D Point Cloud Data with an IFC-Based BIM Model. *Buildings*, 12(10), 1754. <https://doi.org/10.3390/buildings12101754>.

- Li, X., Ren, W., & Bi, K. (2015). FBG force-testing ring for bridge cable force monitoring and temperature compensation. *Sensors And Actuators A Physical*, 223, 105-113. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.01.003>.
- Luleci, F., Catbas, F. N., & Avci, O. (2022). Generative adversarial networks for labeled acceleration data augmentation for structural damage detection. *Journal Of Civil Structural Health Monitoring*, 13(1), 181-198. <https://doi.org/10.1007/s13349-022-00627-8>.
- Manish. (2021, 17 agosto). The Melamchi flood disaster: Cascading hazard and the need for multihazard risk management - ICIMOD. ICIMOD - International Centre For Integrated Mountain Development. <https://www.icimod.org/article/the-melamchi-flood-disaster/>.
- Online, T. (2025, 12 julio). Kailash Mansarovar pilgrims stranded after Miteri Bridge collapse; TAAN urges alternate routes, visa facilitation. *The Himalayan Times*. <https://thehimalayantimes.com/nepal/kailash-mansarovar-pilgrims-stranded-after-miteri-bridge-collapse-taan-urges-alternate-routes-visa-facilitation>.
- Peeters, B. (2000). System Identification and Damage Detection in Civil Engineering. *Ph.D. Thesis*, Department of Civil Engineering, Katholieke Universiteit Leuven (KU Leuven), Belgium.
- Rabi, R. R., Vailati, M., & Monti, G. (2024). Effectiveness of Vibration-Based Techniques for Damage Localization and Lifetime Prediction in Structural Health Monitoring of Bridges: A Comprehensive Review. *Buildings*, 14(4), 1183. <https://doi.org/10.3390/buildings14041183>.
- Suárez, K., Suárez, K., & Suárez, K. (2022, 8 junio). El colapso de un puente colgante en Cuernavaca provoca al menos una veintena de heridos. *El País México*. <https://elpais.com/mexico/2022-06-07/al-menos-una-veintena-de-heridos-por-el-colapso-de-un-puente-colgante-en-cuernavaca.html>.
- The Himalayan Times. (2025, 12 julio). Kailash Mansarovar pilgrims stranded after Miteri Bridge collapse; TAAN urges alternate routes, visa facilitation. <https://thehimalayantimes.com/nepal/kailash-mansarovar-pilgrims-stranded-after-miteri-bridge-collapse-taan-urges-alternate-routes-visa-facilitation>.
- Whelan, M., Gangone, M., Janoyan, K., & Jha, R. (2010). Operational modal analysis of a multi-span skew bridge using real-time wireless sensor networks. *Journal Of Vibration And Control*, 17(13), 1952-1963. <https://doi.org/10.1177/1077546310373058>.
- Zhang, B., Ren, Y., He, S., Gao, Z., Li, B., & Song, J. (2024b). A review of methods and applications in structural health monitoring (SHM) for bridges. *Measurement*, 116575. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.116575>