



INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

# Estudio comparativo de métodos de detección de daño en puentes atirantados

---

José Manuel Machorro López  
Francisco Javier Carrión Viramontes  
Juan Antonio Quintana Rodríguez  
Juan Pablo Amézquita Sánchez  
Martín Valtierra Rodríguez  
Jorge Alberto Hernández Figueroa  
Jesús Iván Valenzuela Delgado  
Héctor Miguel Gasca Zamora  
Miguel Anaya Díaz  
Luis Álvaro Martínez Trujano

Publicación Técnica No. 621  
**Sanfandila, Qro.**  
**2021**

ISSN 0188-7297

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna EI 16/20 *Estudio comparativo de técnicas de detección de daño en estructuras aplicadas a puentes carreteros* y fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte en colaboración con el Departamento de Ingeniería Electromecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, Campus San Juan del Río. Por parte del Instituto Mexicano del Transporte participaron en su desarrollo José Manuel Machorro López, Francisco Javier Carrión Viramontes, Juan Antonio Quintana Rodríguez, Jorge Alberto Hernández Figueroa, Jesús Iván Valenzuela Delgado, Héctor Miguel Gasca Zamora, Miguel Anaya Díaz y Luis Álvaro Martínez Trujano, y por la Universidad Autónoma de Querétaro, Juan Pablo Amézquita Sánchez y Martín Valtierra Rodríguez.

Se reconoce y agradece el apoyo del Dr. Miguel Martínez Madrid, Coordinador de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural; del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) a través del Proyecto No. 34/2018 del Programa "Cátedras CONACYT"; así como la colaboración de los investigadores del *Engineering Applications Research Group* (ENAP-RG) de la Universidad Autónoma de Querétaro campus San Juan del Río.



# Contenido

---

	Página
Índice de figuras .....	v
Índice de tablas .....	ix
Sinopsis.....	xi
Abstract .....	xiii
Resumen ejecutivo.....	xv
Introducción.....	1
1 Descripción del Puente Río Papaloapan .....	7
2 Métodos basados en cambios de parámetros modales y valores RMS/kurtosis.....	11
2.1 Modelo de elementos finitos .....	11
2.2 Método basado en cambios de parámetros modales .....	13
2.3 Método basado en cambios de valores RMS/kurtosis .....	15
2.4 Conclusiones parciales .....	19
3 Método de acumulación de energía <i>wavelet</i> (MAEW) .....	21
3.1 Metodología .....	21
3.2 Resultados .....	22
3.3 Conclusiones parciales .....	26
4 Método basado en el índice de entropía de Shannon (MIES).....	29
4.1 Introducción .....	29
4.2 Metodología .....	30
4.3 Aplicación en un puente atirantado .....	35

---

4.4 Resultados .....	37
4.5 Conclusiones parciales .....	43
5 Comparación de métodos de detección de daño en puentes atirantados....	45
Conclusiones generales .....	49
Bibliografía .....	51



# Índice de figuras

---

		Página
Figura 0.1	Colapso del Silver Bridge en Ohio, EUA el 15 de diciembre de 1967	1
Figura 0.2	Colapso del Schoharie Creek Bridge en Nueva York, EUA el 5 de abril de 1987	2
Figura 0.3	Colapso del Cypress Street Viaduct en California, EUA el 17 de octubre de 1989	2
Figura 0.4	Colapso del Puente 9340 en Minnesota, EUA el 1 de agosto de 2007	3
Figura 1.1	Puente Río Papaloapan	7
Figura 1.2	Dibujo del PRP mostrando dimensiones generales e identificación de semi-arpas	8
Figura 1.3	Diseño de ensamble del sistema de anclaje superior: (a) diseño general y (b) ensamble antes de la instalación	8
Figura 1.4	Falla en elemento de anclaje del tirante 1 semi-arpa 5 (T1S5)	9
Figura 1.5	Diagrama de distribución de sensores colocados en el PRP	10
Figura 2.1	Modelo MEF en ANSYS® del PRP	13
Figura 2.2	Análisis modal del PRP con modelo MEF en ANSYS®; señalando en rojo las variaciones máximas de frecuencia natural y deformación para cada caso dañado comparado con el sano	15
Figura 2.3	Análisis modal del PRP con modelo MEF en ANSYS® y datos experimentales para los primeros cuatro modos flexionantes	15
Figura 2.4	Croquis del PRP indicando: (a) ubicación del tirante dañado T6S3 con reducción de tensión y (b) ubicación de los puntos de medición (S1-S12) y semi-arpas (SH3-SH6)	16
Figura 2.5	Valores RMS obtenidos en tres posiciones diferentes del tablero del puente (25%, 50% y 75% de L) con simulación MEF para puente sano y puente con tres magnitudes	17

	diferentes de daño en tablero al 25% de L (0.1h, 0.3h y 0.5h)	
Figura 2.6	Valores kurtosis obtenidos en tres posiciones diferentes del tablero del puente (25%, 50% y 75% de L) con simulación MEF para puente sano y puente con tres magnitudes diferentes de daño en tablero al 25% de L (0.1h, 0.3h y 0.5h)	18
Figura 2.7	Valores RMS obtenidos en doce posiciones diferentes del tablero del puente con simulación MEF para puente sano y puente con tres magnitudes diferentes de daño en tirante T6S3 (trabajando al 70%, 35% y 0% de su tensión)	19
Figura 2.8	Valores kurtosis obtenidos en doce posiciones diferentes del tablero del puente con simulación MEF para puente sano y puente con tres magnitudes diferentes de daño en tirante T6S3 (trabajando al 70%, 35% y 0% de su tensión)	19
Figura 3.1	Diagramas CWT a partir de las señales de aceleración para el área de interés para: (a) puente sano y (b) puente con tablero dañado a 0.75L. Tres diferentes posiciones de medición para cada caso (de arriba a abajo: 0.25L, 0.50L y 0.75L)	23
Figura 3.2	EW total promedio a partir de las señales de aceleración para puente sano y puente con tablero dañado a 0.75L. Tres diferentes condiciones de las señales (de arriba a abajo: original, ruidosa y filtrada)	23
Figura 3.3	EW total promedio a partir de las señales de aceleración filtradas para puente sano y puente con tablero dañado a 0.25L con diferente severidad	24
Figura 3.4	EW total promedio a partir de las señales de desplazamiento filtradas para: (a) puente sano vs. puente con tirante dañado a 0.77L y (b) puente sano vs. puente con tirante dañado a 0.42L	25
Figura 3.5	EW total a partir de las señales experimentales filtradas para: (a) puente sano y (b) puente con tirante dañado T1S5. Tres diferentes posiciones de medición para cada caso (de arriba a abajo: R1, R2 y R4)	26
Figura 3.6	EW total promedio a partir de las señales experimentales filtradas para puente sano vs. puente con tirante dañado T1S5	26
Figura 4.1	Diagrama esquemático del MIES	30
Figura 4.2	Tipos de funciones de pertenencia	34

Figura 4.3	Diagrama de flujo para localización de daño y (b) localización de daño basada en la regla $3\sigma$	34
Figura 4.4	Ubicación de los sensores usados para monitorear el comportamiento del puente (sensores: S1-S12; semi-arpas: SH3-SH6)	35
Figura 4.5	Tirante removido para generar la condición de daño: (a) condición real y (b) dibujo esquemático	36
Figura 4.6	Acelerómetro colocado en el tablero del puente aguas arriba y adquiriendo datos con tráfico aleatorio	36
Figura 4.7	Señales de vibración medidas por doce sensores para: (a) condición sana y (b) condición dañada (tirante removido)	38
Figura 4.8	Distribución de los valores IES estimados para doce sensores del puente en condición sana y dañada	39
Figura 4.9	Distribución de datos estimada por el MKW para las condiciones sanas y dañadas y los diversas IE: (a) MO, (b) ME, (c) RMS, (d) SMR, (e) R, (f) M, (g) V, (h) DE, (i) A, (j) K, (k) 5thM, (l) 6thM, (m) FFRMS, (n) FFSMR, (o) FC, (p) FI, y (q) FL	40
Figura 4.10	Sistema CLD propuesto: (a) funciones gaussianas para la DE y el FFRMS y (b) funciones de pertenencia	42
Figura 4.11	Resultados para la localización de daño	43



## Índice de tablas

---

		Página
Tabla 4.1	Índices estadísticos examinados para la obtención de características principales de los valores IES	31
Tabla 4.2	Valores-p calculados por el MKW para los 17 IE evaluados para discriminar entre puente sano y dañado	41
Tabla 4.3	Reglas para el CLD propuesto	42
Tabla 4.4	Resultados del CLD (matriz de confusión)	42
Tabla 5.1	Comparación de métodos de detección de daño en puentes atirantados desarrollados recientemente en el GME – ENAP-RG	46
Tabla 5.2	Comparación de métodos de detección de daño en tirantes de puentes atirantados	47



## Sinopsis

---

Los puentes atirantados son estructuras críticas que requieren la implementación de métodos para identificar daño con la suficiente anticipación y así prevenir accidentes que pongan en riesgo a los usuarios o afecten las cadenas de transporte.

La investigación realizada en la presente publicación se ocupa de este problema, mostrando la comparación de diversos métodos desarrollados para identificar daño en puentes atirantados, los cuales se aplicaron en el Puente Río Papaloapan para validarlos tanto de forma numérica mediante un modelo de elementos finitos como en el puente mismo.

La comparación de dichos métodos arrojó que el método de acumulación de energía *wavelet* (MAEW) y el método basado en el índice de entropía de Shannon (MIES) son los más promisorios para identificar daño; por lo que además se compararon contra otros métodos desarrollados recientemente por diferentes investigadores del mundo. La evaluación indica que los métodos MAEW y MIES tienen grandes ventajas respecto a otros métodos, ya que incluyen análisis en un puente real, se implementan a bajo costo, no requieren un modelo numérico, son capaces de detectar y localizar daño con gran precisión y no requieren mediciones largas en diferentes estaciones del año; lo que resulta atractivo para implementarlos en puentes reales.



# Abstract

---

Cable-stayed bridges are critical structures that require the implementation of methods to identify damage well in advance and in this way, prevent accidents that put users at risk or affect transport chains.

The research performed in this publication deals with this problem, showing the comparison of diverse methods developed to identify damage in cable-stayed bridges, which were applied on the Rio Papaloapan Bridge to validate them numerically through a finite element model and on the bridge itself.

The comparison of these methods showed that the wavelet energy accumulation method (MAEW) and the method based on the Shannon entropy index (MIES) are the most promising to identify damage; therefore, they were also compared against other methods recently developed by different researchers around the world. The evaluation indicates that the MAEW and MIES have great advantages over other methods, since they include analysis in a real bridge, are implemented at low cost, do not require a numerical model, are capable of detecting and locating damage with great precision, and do not require long measurements in different seasons of the year; which is attractive to implement them in real bridges.



## Resumen ejecutivo

---

La infraestructura civil, como los puentes, es crucial para las economías actuales de todos los países del mundo; desafortunadamente, un porcentaje significativo de esas estructuras se encuentra operando cerca del final de su vida útil de diseño y, además, en condiciones peligrosas (por ejemplo, sin seguir programas de mantenimiento adecuados, sobrecargadas, etc.). En consecuencia, se han producido accidentes catastróficos, incluso en los países más desarrollados, debido a fallas, deterioros o acumulación de daño en diferentes elementos de los puentes, provocando el colapso de estructuras completas y por tanto muertes humanas devastadoras y pérdidas económicas substanciales. Por ende, es de vital importancia desarrollar e implementar métodos en línea, confiables y de bajo costo para detectar y localizar daño no visible en puentes sin la necesidad de interrumpir el tráfico vehicular.

En los últimos años, a nivel mundial, para atender la necesidad de salvaguardar la integridad estructural de los puentes, se han desarrollado sistemas de monitoreo estructural y se están investigando distintos métodos de análisis para detección, ubicación y calificación del daño en los puentes. Esto último, con pocos casos de éxito, ya que existe una muy amplia variedad de tipos de puentes y tienen una gran cantidad de variables e incertidumbres involucradas y, por lo tanto, se requiere más trabajo sobre el tema.

Este estudio analiza y compara diferentes métodos de identificación de daño aplicables a puentes atirantados: método basado en cambios de parámetros modales, métodos basados en cambios de valores RMS/kurtosis, método de acumulación de energía *wavelet* (MAEW) y método basado en el índice de entropía de Shannon (MIES). Estos métodos, por un lado, se contrastaron utilizando datos sintéticos provenientes de simulaciones numéricas con un modelo de elementos finitos del Puente Río Papaloapan sometido a diferentes escenarios de daño; y por el otro lado, usando los datos experimentales provenientes del sistema de monitoreo del puente bajo condiciones reales de operación durante distintas etapas de mantenimiento, permitiendo analizar y comparar situaciones con daño y sin daño.

Los resultados indican que el método basado en cambios de parámetros modales, tal como se ha comentado en la literatura especializada, no provee garantías de identificar daño con la exactitud necesaria, ya que los parámetros modales tuvieron cambios muy pequeños debido al daño. Asimismo, los métodos basados en cambios de valores RMS/kurtosis mostraron algunos resultados interesantes únicamente de forma numérica bajo condiciones muy controladas, mientras que al aplicarlos en el puente real no exhibieron ningún indicio de poder identificar daño.

Finalmente, los métodos MAEW y MIES resultaron ser los más promisorios para detectar y localizar daño en el puente real, por lo que se compararon también contra otros métodos de vanguardia presentados recientemente en la literatura mundial, quedando muy bien posicionados y resaltando sus ventajas de haber sido probados en un puente real, ser de bajo costo y capaces de detectar daño de forma eficiente y localizarlo con gran precisión. Por tanto, se concluye que es conveniente continuar los trabajos de investigación con estos métodos para que puedan implementarse de forma automática en los puentes atirantados más importantes del país.

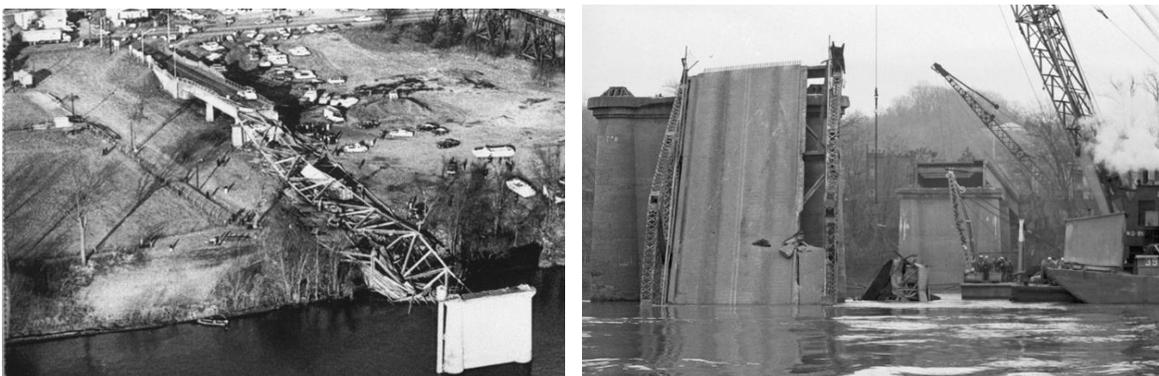
# Introducción

---

La detección de daño en puentes vehiculares ha sido objeto de una intensa investigación a nivel mundial, ya que los daños estructurales representan una seria amenaza para la vida útil y la seguridad de estas construcciones civiles. El objetivo principal de la detección de daño es identificar la existencia de cualquier defecto, determinar su ubicación y evaluar su grado de severidad.

Con la oportuna detección de daño se podrían evitar colapsos de puentes con consecuencias trágicas como han ocurrido en diversos países a lo largo de la historia. Tan sólo en Estados Unidos de América, en los últimos 60 años se han presentado terribles colapsos de puentes vehiculares que han cobrado la vida de cientos de personas y millonarias pérdidas económicas, lo cual magnifica la importancia de lograr métodos confiables para la detección de daño y, a su vez, muestra que no es una tarea fácil, ya que hoy en día con todos los adelantos tecnológicos, ni en el país más poderoso del mundo se han logrado implementar métodos plenamente confiables que aseguren la detección de daño antes de una tragedia. Algunos de estos accidentes se describen a continuación:

El 15 de diciembre de 1967, el Silver Bridge, que era un puente colgante que conectaba dos ciudades sobre el Río Ohio en EUA, se derrumbó durante la hora de mayor tránsito vehicular, provocando la muerte de 46 personas. Las investigaciones determinaron que la causa del colapso fue la falla de un tirante del puente debido a un pequeño defecto de 2.5 mm de profundidad. El puente no había tenido un mantenimiento adecuado y el daño no se detectó a tiempo [1], ver figura 0.1.



**Figura 0.1. Colapso del Silver Bridge en Ohio, EUA el 15 de diciembre de 1967.**

El 5 de abril de 1987 colapsó el Schoharie Creek Bridge en Fort Hunter, Estado de Nueva York, EUA. La construcción defectuosa fue la culpable del derrumbe del puente, ya que los pilotes del puente se construyeron en el cauce del río en lugar de introducirlos en el lecho de roca debajo de la superficie [2]. Este accidente,

involucrando negligencia en la construcción y la incapacidad para haber detectado una situación anómala que ponía en riesgo la integridad del puente, provocó la muerte de 10 personas, ver figura 0.2.



**Figura 0.2. Colapso del Schoharie Creek Bridge en Nueva York, EUA el 5 de abril de 1987.**

El 17 de octubre de 1989, una gran parte del Cypress Street Viaduct en Oakland, California, EUA se derrumbó durante un terremoto, debido al movimiento del suelo y defectos estructurales que no fueron detectados previamente, provocando la muerte de 42 personas [2], ver figura 0.3.



**Figura 0.3. Colapso del Cypress Street Viaduct en California, EUA el 17 de octubre de 1989.**

Asimismo, el Puente 9340 falló a la hora pico del 1 de agosto de 2007 en Minnesota, EUA. Trece personas murieron y 145 resultaron heridas (ver figura 0.4). El puente transportaba 140,000 vehículos diariamente y después del colapso el Gobierno recomendó inspeccionar los 700 puentes de construcción similar en el país, ya que después del colapso se descubrió un posible defecto de diseño en el Puente 9340, relacionado con grandes láminas de acero llamadas placas de refuerzo que se utilizaron para conectar las vigas entre sí en la estructura de armadura [3].



**Figura 0.4. Colapso del Puente 9340 en Minnesota, EUA el 1 de agosto de 2007.**

Las técnicas de monitoreo de salud estructural (SHM, por sus siglas en inglés) basadas en el análisis y post-procesamiento de las respuestas vibratorias de los puentes se han convertido en las alternativas más prometedoras para detectar, localizar y evaluar la severidad de un daño de manera eficiente en este tipo de estructuras civiles; garantizando su integridad y prediciendo su vida útil [4, 5].

De esta forma, los métodos basados en vibraciones para identificar daño en estructuras sometidas a cargas móviles, como puentes, se pueden clasificar de manera general en métodos paramétricos y no paramétricos [6]. Los métodos paramétricos trabajan con datos en el dominio modal, mientras que los métodos no paramétricos utilizan datos en el dominio del tiempo o de la frecuencia.

Los métodos paramétricos, como los métodos basados en cambios de frecuencias naturales, formas modales y relaciones de amortiguamiento [7–9], energía de deformación modal [10, 11], curvatura de flexibilidad dinámica [12], criterio de aseguramiento modal (MAC, *modal assurance criterion*) [13], criterio de aseguramiento modal coordinado (COMAC, *coordinate modal assurance criterion*) [14] y curvaturas modales [15], entre otros, surgieron de la técnica de análisis modal experimental y se basan en cambios de las propiedades modales de una estructura, entre su condición sana y dañada, para detectar daño. Por tanto, los métodos de dominio modal presentan ventajas interesantes, por ejemplo, las propiedades modales tienen significados físicos que se correlacionan con daño, son fáciles de interpretar y utilizan datos de salida de la estructura bajo excitaciones ambientales (por ejemplo, viento, tráfico, peatones, etc.) sin la necesidad de fuerzas artificiales. Lamentablemente, estos métodos también tienen importantes desventajas, que han provocado que con el paso de los años se usen cada vez menos; algunos de esos inconvenientes están relacionados con la pérdida de gran parte de la información, los errores numéricos provocados por un ajuste de curva inexacto y la sensibilidad al ruido; además, la mayoría de esos métodos no han mostrado resultados contundentes en casos prácticos de estructuras reales para ser utilizados de forma recurrente y confiable [6].

Por otro lado, se han desarrollado métodos no paramétricos basados en el dominio de la frecuencia con resultados muy prometedores para la detección de daño estructural, algunos ejemplos de esos métodos utilizan formas FRF (*frequency*

*response function*) [16], curvaturas FRF [17–19], funciones de transmisibilidad [20–22], descomposición en el dominio de la frecuencia (FDD, *frequency domain decomposition*) [23], etc. Estos tipos de métodos descomponen una señal en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, lo cual se obtiene mediante técnicas de procesamiento de señales y estimación no paramétricas, haciendo uso generalmente de la transformada de Fourier. Por tanto, la esencia de los métodos basados en el dominio de la frecuencia conduce a ventajas útiles, por ejemplo, el volumen de datos se puede reducir significativamente, se proporciona mucha información sobre el comportamiento dinámico de la estructura en un amplio rango de frecuencia, y no se requiere post-procesamiento adicional. Sin embargo, los métodos basados en el dominio de la frecuencia también tienen que lidiar con inconvenientes, como la pérdida de información que debe compensarse, la necesidad de información de entrada para mejorar los resultados y la incertidumbre de los patrones relacionados con el daño, entre otros [6].

Por último, los métodos no paramétricos basados en el dominio del tiempo son muy atractivos ya que todas las mediciones del comportamiento dinámico de las estructuras se realizan siempre en el dominio del tiempo y, además, estos métodos superan la mayor parte de los inconvenientes que presentan los métodos mencionados anteriormente. Algunas de sus ventajas son que utilizan directamente las respuestas en el dominio del tiempo, no requieren transformaciones de dominio (incluida la transformación de frecuencia), no hay errores asociados como fugas y truncamientos, y se conserva el comportamiento no lineal. Algunos de los métodos basados en el dominio del tiempo más utilizados son el método de Ibrahim [24], el método del decremento aleatorio (RDM, *random decrement method*) [25], el método de la familia auto-regresiva (AR, *auto-regressive*) como los modelos AR o ARMA (*auto-regressive moving average*) [26–28] y el método de la descomposición del modo empírico (EMD, *empirical mode decomposition*) [29, 30]. No obstante, las principales desventajas que se han asociado con estos métodos son los efectos significativos del ruido y la dificultad para interpretar la información de la señal [6].

En la presente publicación se comparan diferentes métodos de daño en puentes atirantados. Primeramente, en el capítulo 1, se presenta la descripción del puente utilizado para el desarrollo y aplicación de los diversos métodos de detección de daño, el cual es el puente atirantado Puente Río Papaloapan (PRP). Posteriormente, en los capítulos 2, 3 y 4, se presenta la descripción y resultados de la aplicación de los métodos de detección de daño desarrollados por los investigadores que participaron en esta investigación, en los cuales se incluye el método paramétrico basado en cambios en frecuencias naturales y formas modales, y los métodos no paramétricos basados en cambios de valores estadísticos como RMS y kurtosis, el método de acumulación de energía *wavelet* (MAEW) y el método basado en el índice de entropía de Shannon (MIES). Como se mencionó anteriormente, el método basado en cambios de parámetros modales ha sido muy estudiado por diversos investigadores y, en esta publicación, se analiza brevemente para determinar si, a pesar de sus desventajas, puede ayudar en la detección de daño en puentes; de forma similar se aplican los métodos basados en cambios de valores RMS y kurtosis. Posteriormente, se presentan otros dos métodos no

paramétricos más sofisticados para incluirse en la comparativa: el MAEW, que fue desarrollado y presentado a detalle en la publicación técnica IMT del año pasado [31]; y el MIES, que es un nuevo método desarrollado y presentado por primera vez en esta publicación. Finalmente, en el capítulo 5 se presenta la comparación de los métodos de detección de daño mencionados, resaltando el tipo de análisis efectuado en cada uno, el tipo de puente utilizado, tipos de daño incluidos, ventajas y desventajas. A partir de dicha comparativa se seleccionan los métodos más promisorios para implementarse en puentes reales con el objetivo de detectar daño a tiempo y, esos a su vez, se comparan contra métodos innovadores presentados recientemente en la literatura mundial, lo que permite situar los métodos desarrollados en esta publicación en el contexto de las investigaciones que se realizan hoy en día en diferentes países, así como evaluar y valorar sus capacidades.



# 1. Descripción del Puente Río Papaloapan

---

El Puente Río Papaloapan (PRP) es un puente atirantado construido en 1994 y se encuentra ubicado en el Estado de Veracruz, México (ver figura 1.1). Tiene una longitud total de 407.21 m y un claro principal de 203 m, con 112 tirantes distribuidos en 8 semi-arpas indicadas con la nomenclatura SH en la figura 1.2. Cada semi-arpa está constituida por 14 tirantes, siendo el primer tirante, identificado con el número 1, el más corto; y el último tirante, identificado con el número 14, el más largo. Con el fin de anclar los tirantes en las torres se utilizan sistemas de anclaje superior, cuyo diseño consiste en una placa de acero soldada a los elementos de anclaje, los cuales son cilíndricos por un lado y planos por el lado soldado (ver figura 1.3). El lado cilíndrico está roscado para atornillar el collar que sujeta el tirante en la parte superior [32].



Figura 1.1. Puente Río Papaloapan.

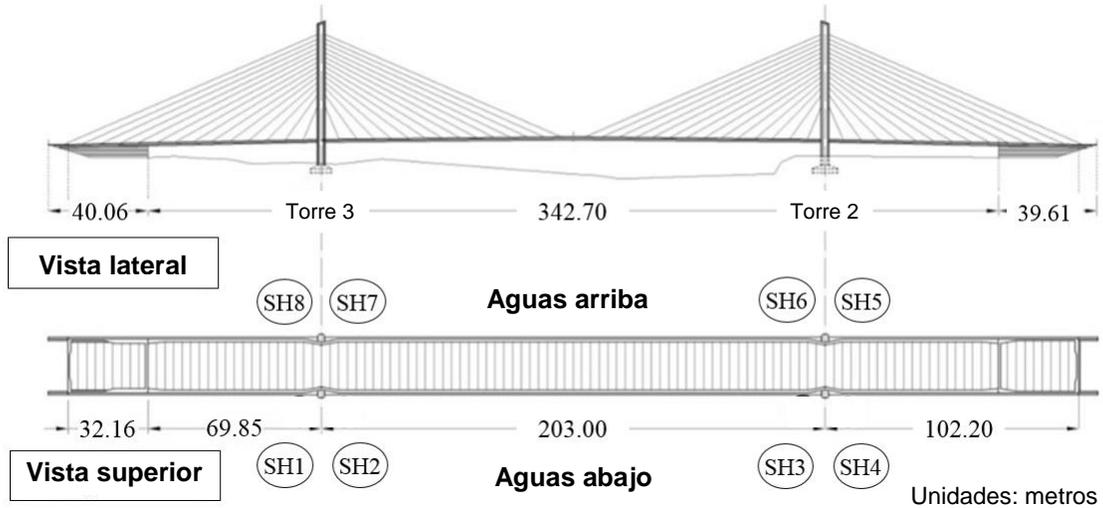


Figura 1.2. Dibujo del PRP mostrando dimensiones generales e identificación de semi-arpas.

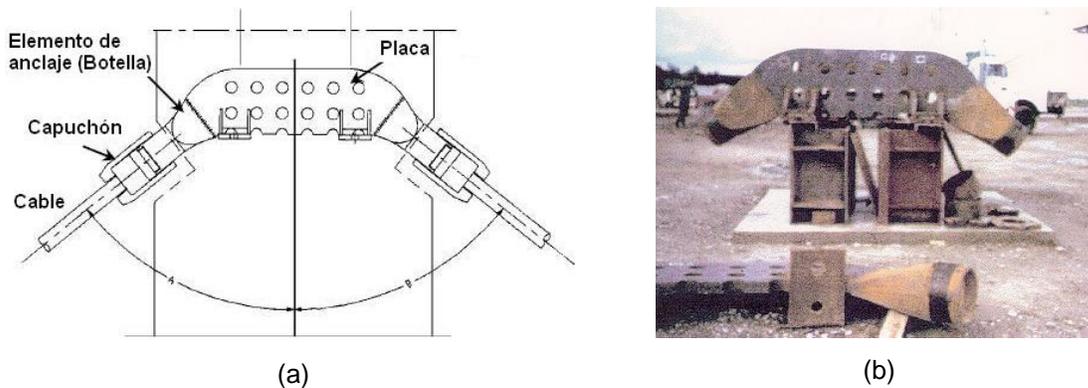


Figura 1.3. Diseño de ensamble del sistema de anclaje superior: (a) diseño general y (b) ensamble antes de la instalación.

Este puente, hasta ahora, ha tenido dos fallas principales en los elementos de anclaje superior. El primer accidente ocurrió en enero de 2000, cuando el tirante T11S7 (correspondiente al tirante 11 de la semi-arpa 7) colapsó debido a deficiencias microestructurales del acero usado para su elemento de anclaje superior. A pesar de la excelente calidad del acero, un proceso de fundición deficiente resultó en un material frágil de baja tenacidad con una microestructura de gran tamaño de grano (ASTM 2) y un alto contenido de poros e inclusiones [33, 34]. En este caso, los defectos en la zona afectada por el calor crecieron debido a la fatiga hasta la fractura completa [35]. Desafortunadamente, ningún sistema SHM estaba implementado cuando ocurrió este accidente.

La segunda falla ocurrió el 10 de junio de 2015. En este caso, tuvo lugar en la interfaz de soldadura entre el elemento de anclaje y la placa de acero del tirante T1S5 (correspondiente al tirante 1 de la semi-arpa 5). Los análisis mostraron que una grieta inicial creció debido a la fatiga hasta que alcanzó un tamaño de casi el

65% del área de la sección transversal. En la figura 1.4 se pueden identificar claramente dos zonas diferentes; en la primera, que es característica del crecimiento por fatiga, se presentó oxidación en su superficie después de la falla, lo que indica que hubo tiempo suficiente para filtrar agua dentro de la grieta. La segunda, típica de la fractura dúctil, correspondió a la ruptura final por sobrecarga [36].

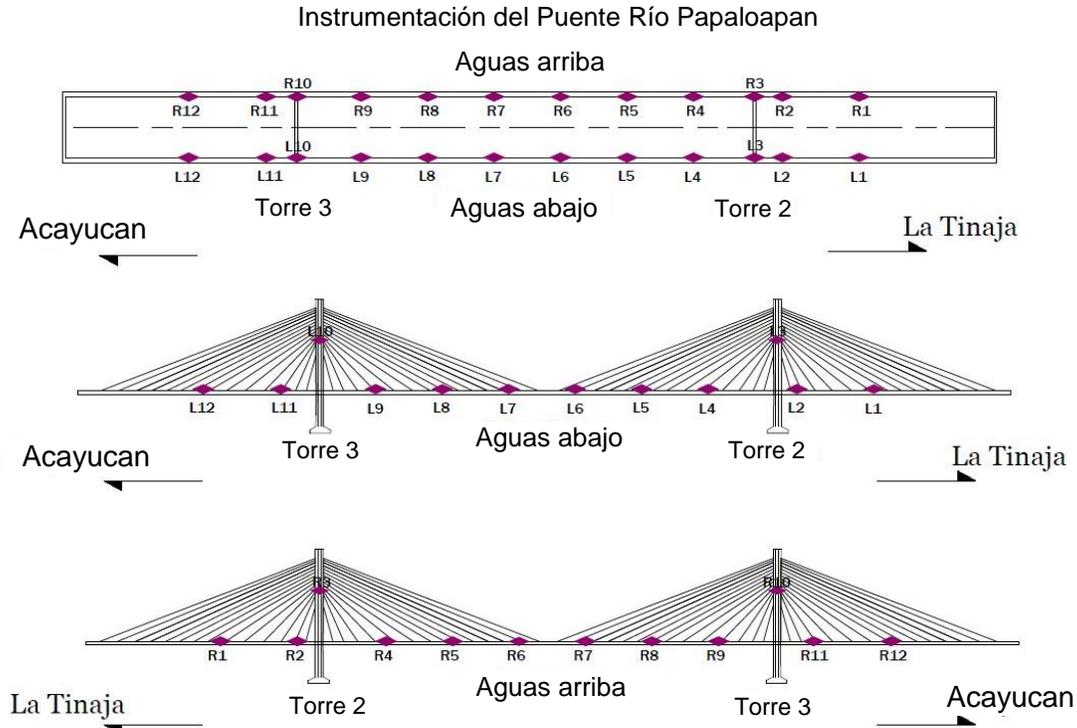


Figura 1.4. Falla en elemento de anclaje del tirante 1 semi-arpa 5 (T1S5).

Después de la primera falla del puente, se instaló en 2013 un sistema SHM de alcance completo y el PRP se convirtió en el primer puente atirantado en México con un sistema de monitoreo remoto de alcance completo. El diseño del sistema se basó en sensores FBG (*Fiber Bragg Grating*) y se configuró en tres subsistemas: sensores, monitoreo local y fotovoltaico.

El subsistema de sensores se compone de 24 sensores de deformación, 24 acelerómetros, un sensor de desplazamiento, ocho sensores de inclinación y cinco sensores de temperatura, todos FBG; el subsistema de monitoreo local incluye un interrogador FO, un multiplexor y una computadora; y el subsistema fotovoltaico tiene 96 celdas solares, 36 baterías de ciclo profundo y sus controladores. Además, el sistema SHM incluye dos cámaras de video, una estación meteorológica y una estación sísmológica. El sistema SHM se comunica vía satélite al Instituto Mexicano del Transporte.

Los sensores se distribuyeron para analizar la dinámica del tablero del puente y de las cuatro torres; así, 10 galgas extensométricas están ubicadas debajo de cada una de las vigas principales del tablero del puente, y una en el costado a media altura de cada torre. En la parte superior de cada una de las cuatro torres, se encuentran dos sensores de inclinación y dos acelerómetros. Los otros 16 acelerómetros se colocaron a la mitad de los tirantes 4 y 11 de cada semi-arpa (figura 1.5).



**Figura 1.5. Diagrama de distribución de sensores colocados en el PRP.**

Aunque el sistema completo SHM descrito anteriormente estaba funcionando en el puente antes de que ocurriera la segunda falla, el daño no se detectó. Desde que se implementó el sistema SHM, se ha llevado a cabo un seguimiento histórico detallado de los valores de los parámetros típicos, tales como frecuencias naturales, formas modales, deformaciones, inclinaciones y tensión de los tirantes; sin embargo, ninguno de ellos tuvo variaciones anormales para advertir que había un elemento importante dañado.

Por lo tanto, en este trabajo se estudian métodos tradicionales de identificación de daño en puentes atirantados y se desarrollan nuevos métodos sofisticados para evitar fallas en estas estructuras. Dichos métodos se comparan entre sí y también contra otros métodos recientemente propuestos en la literatura mundial, lo que permite conocer sus capacidades y determinar cuáles son los más promisorios para implementarse en los puentes atirantados más críticos del país, con el objetivo de proveer confiabilidad en el uso de ellos, ya que se tendría certeza que pueden detectar daño a tiempo y evitar accidentes debido a colapsos de puentes, con las correspondientes fatalidades humanas y millonarias pérdidas económicas que causan estas tragedias.

## 2. Métodos basados en cambios de parámetros modales y valores RMS/kurtosis

---

Los primeros métodos de detección de daño en puentes atirantados para incluirse en la comparativa corresponden con los métodos más sencillos: el método basado en cambios de parámetros modales y el método basado en cambios de valores RMS/kurtosis. Como se explicó en la Introducción, estos métodos han sido muy estudiados en la literatura y se han tratado de implementar en estructuras reales, sin embargo, varios factores han complicado su confiabilidad, ya que es difícil extraer de ellos la información local como pequeños defectos, son susceptibles a las condiciones ambientales (es decir, temperatura, humedad, carga, etc.) y generalmente requieren de un modelo matemático/numérico robusto de la estructura civil, lo cual es una tarea desafiante y tiende a debilitar el resultado derivado. No obstante, en este capítulo se estudian ambos métodos aplicados en el PRP para conocer si pueden coadyuvar en la detección de daño o usarse para complementar otros métodos.

### 2.1 Modelo de elementos finitos

Para el desarrollo numérico de esta investigación, se elaboró un código MEF (método del elemento finito) llamado "BRITRANSYS" en ANSYS<sup>®</sup> (V 14.0), conformado por dos partes: a) un modelo detallado basado en las características del PRP con la posibilidad de incluir diferentes tipos de daño, como daño en el tablero y tirantes; b) la solución y respuestas transitorias obtenidas mientras una carga (fuerza) se mueve en diferentes nodos a lo largo de cualquier sección o todo el tablero del puente (simulando un vehículo que pasa por el puente). Se pueden considerar diferentes velocidades y pesos para el "vehículo" y las respuestas dinámicas (desplazamientos y aceleraciones) se pueden obtener en cualquier nodo del modelo.

En cuanto al modelo MEF, el código ANSYS APDL<sup>®</sup> se construyó de la siguiente manera: la geometría del modelo del PRP se creó en AutoCAD<sup>®</sup>, luego se convirtió en comandos APDL<sup>®</sup> a través de una hoja Excel<sup>®</sup> en forma de coordenadas de *keypoints* (puntos clave); se definieron *keypoints* iniciales y finales para cada línea. La escritura de comandos para áreas se realizó mediante el uso de comandos APDL<sup>®</sup> simples, principalmente "\*" DO".

Se utilizaron tres tipos diferentes de elementos para construir el modelo: BEAM188 para las torres, vigas principales y vigas transversales; SHELL181 para la losa/tablero, y LINK180 para los tirantes. Luego se definieron las propiedades del

material para cada elemento estructural, así como las propiedades de la sección transversal.

BEAM188 es un elemento viga 3-D de dos nodos adecuado para analizar estructuras tipo vigas delgadas a moderadamente anchas-gruesas. Este elemento se basa en la teoría de la viga Timoshenko, que incluye efectos de deformación por cortante y tiene 6 o 7 grados de libertad (GDL) en cada nodo.

SHELL181 es un elemento estructural de cuatro nodos con seis GDL en cada nodo: traslaciones en las tres direcciones y rotaciones alrededor de los tres ejes. Es adecuado para analizar estructuras tipo placas-láminas delgadas a moderadamente gruesas.

LINK180 es un elemento uniaxial tipo barra-armadura 3-D de compresión-tensión con tres GDL en cada nodo (traslaciones en las tres direcciones nodales), el cual es útil en una variedad de aplicaciones de ingeniería. Las opciones de sólo tensión (cable) y sólo compresión (*gap*) son compatibles. Este elemento incluye las capacidades de plasticidad, fluencia, rotación y grandes deformaciones.

Cada tirante en el puente tiene valores específicos de área, masa y esfuerzo (relacionado con la tensión). Los datos de esfuerzo se cargaron al software en una matriz de vectores con 112 espacios; los espacios se llenaron cargando datos con el comando `"*VREAD"`. Este comando toma los datos previamente almacenados en un archivo de extensión `".txt"`. Posteriormente, se asignaron los valores de área y masa a cada línea que corresponde a un tirante.

Previamente, para mallar los elementos estructurales, sus atributos como área de sección transversal, material y tipo de elemento se asignaron a cada grupo de elementos estructurales diferentes. Una vez hecho esto, todo el modelo se malló para estar compuesto por 7,365 elementos y 8,053 nodos.

Finalmente, se definieron las restricciones y el estado inicial que establece la tensión inicial de cada tirante. Para finalizar un modelo de puente base, se configuró el comando `"SOLVE"`.

Asimismo, para obtener las respuestas dinámicas de desplazamiento/aceleración, se definió un carril específico donde pasa la carga en movimiento, así como la sección longitudinal correspondiente del tablero del puente; luego, se crearon los respectivos nodos uno tras otro (en forma de línea recta) y numerados consecutivamente. Después de eso, la carga móvil que simula un vehículo se definió con valores específicos de peso y velocidad, y se colocó en cada nodo mediante la solución transitoria de ANSYS®. Finalmente, se establecieron las respuestas que se requerían obtener y los nodos donde se analizarían dichas respuestas; los datos correspondientes se guardaron en formato `".txt"` para posprocesarse.

La figura 2.1 muestra el modelo MEF sano. Este modelo MEF se calibró con resultados experimentales obtenidos del monitoreo real del PRP.

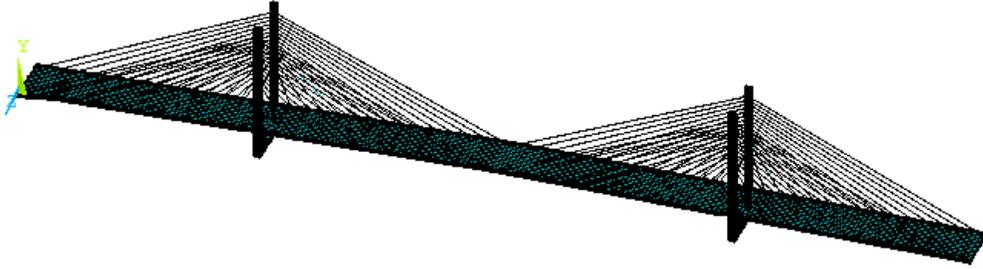


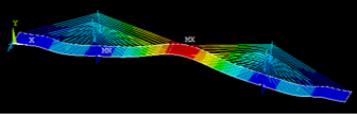
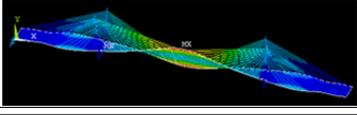
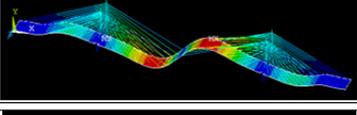
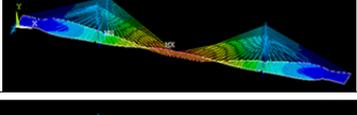
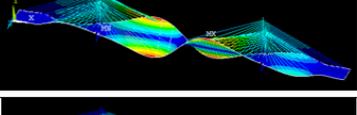
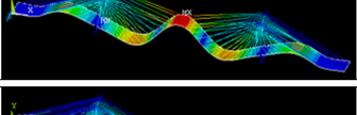
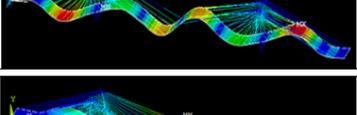
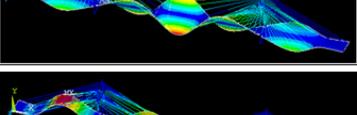
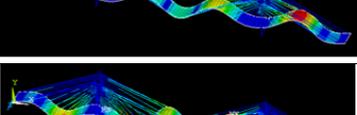
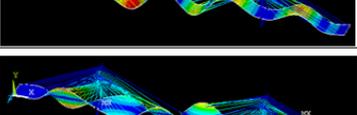
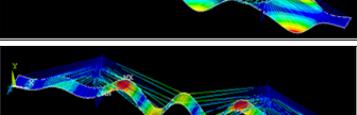
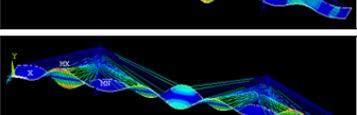
Figura 2.1. Modelo MEF en ANSYS® del PRP.

## 2.2 Método basado en cambios de parámetros modales

En base al modelo MEF del PRP presentado en la sección anterior, se estimaron las primeras 16 formas modales para: a) puente sano; b) puente con daño en el tirante T6S3 (tirante 6 de la semi-arpa 3), haciendo que trabaje al 70%, 35% y 0% de su tensión; y c) puente con daño en el tablero (simulado al reducir un 30% el área de la sección transversal en el 5% del puente de 203 m de longitud (tablero del puente entre torres) y ubicado al 25% de la longitud considerada del tablero).

En la figura 2.2 se ilustra que las formas modales son idénticas para puente sano y puente con cualquier magnitud de daño en tirante; y además, se puede apreciar que los porcentajes de variación en las frecuencias naturales y deformaciones en cada modo, comparando casos sanos con dañados, son muy pequeños, incluso para el caso más drástico de daño en tirante (menos del 0.02% de variación en frecuencia y menos del 0.25% de variación en deformación), lo cual coincide cualitativamente bien con los resultados reales del puente antes y después del destensando del tirante T6S3. En la figura 2.3 se muestran, a manera de resumen, los resultados experimentales obtenidos referentes a las frecuencias naturales de los cuatro primeros modos flexionantes del PRP, donde se aprecia la misma tendencia de variaciones muy pequeñas entre caso sano y dañado; además, se puede observar una buena similitud entre las frecuencias naturales numéricas y experimentales para el caso sano. Cabe mencionar que para el caso de daño en el tablero, las formas modales con el modelo MEF también fueron idénticas comparando con el caso sano, mientras que los porcentajes de variación en las frecuencias naturales y deformaciones fueron aún menores que los obtenidos para el caso con la menor magnitud de daño en el tirante, por lo que por intereses de brevedad no se presentan los resultados correspondientes para el caso de tablero dañado.

Así entonces, esos parámetros modales (formas modales, frecuencias naturales y deformaciones) no cambian lo suficiente debido al daño y, por tanto, no pueden considerarse como indicadores que adviertan sobre la presencia de algún defecto, requiriendo métodos confiables de detección de daño como los presentados más adelante en el capítulo 3 y capítulo 4.

ANÁLISIS MODAL DE PUENTE RÍO PAPALOAPAN CON MODELO MEF-ANSYS						
Número modo y tipo	Forma modal	Parámetro	Caso			
			Sano	T6S3 al 70%	T6S3 al 35%	T6S3 al 0%
1 Flexionante		Frecuencia (Hz)	0.42363	0.42361	0.42359	0.42357
		Variación en frecuencia (%)	0.0000	-0.0047	-0.0094	-0.0142
		Máxima deformación (m)	0.062284	0.062293	0.062304	0.062315
		Variación en máx. def. (%)	0.0000	0.0144	0.0321	0.0498
2 Torsional		Frecuencia (Hz)	0.52716	0.52713	0.52711	0.52708
		Variación en frecuencia (%)	0.0000	-0.0057	-0.0095	-0.0152
		Máxima deformación (m)	0.081351	0.081362	0.081374	0.081387
		Variación en máx. def. (%)	0.0000	0.0135	0.0283	0.0443
3 Flexionante		Frecuencia (Hz)	0.55715	0.55712	0.55708	0.55704
		Variación en frecuencia (%)	0.0000	-0.0054	-0.0126	-0.0197
		Máxima deformación (m)	0.055774	0.055774	0.055782	0.055792
		Variación en máx. def. (%)	0.0000	0.0000	0.0143	0.0323
4 Flexionante Torsional		Frecuencia (Hz)	0.59528	0.59525	0.59521	0.59517
		Variación en frecuencia (%)	0.0000	-0.0050	-0.0118	-0.0185
		Máxima deformación (m)	0.049397	0.049408	0.049421	0.049434
		Variación en máx. def. (%)	0.0000	0.0223	0.0486	0.0749
5 Torsional Flexionante		Frecuencia (Hz)	0.75236	0.75232	0.75227	0.75223
		Variación en frecuencia (%)	0.0000	-0.0053	-0.0120	-0.0173
		Máxima deformación (m)	0.074396	0.074422	0.074451	0.074480
		Variación en máx. def. (%)	0.0000	0.0349	0.0739	0.1129
6 Flexionante		Frecuencia (Hz)	0.80674	0.80671	0.80668	0.80664
		Variación en frecuencia (%)	0.0000	-0.0037	-0.0074	-0.0124
		Máxima deformación (m)	0.055259	0.055268	0.055278	0.055288
		Variación en máx. def. (%)	0.0000	0.0163	0.0344	0.0525
7 Flexionante		Frecuencia (Hz)	0.97209	0.97208	0.97207	0.97206
		Variación en frecuencia (%)	0.0000	-0.0010	-0.0021	-0.0031
		Máxima deformación (m)	0.053276	0.053280	0.053285	0.053289
		Variación en máx. def. (%)	0.0000	0.0075	0.0169	0.0244
8 Torsional		Frecuencia (Hz)	1.07511	1.07507	1.07503	1.07499
		Variación en frecuencia (%)	0.0000	-0.0037	-0.0074	-0.0112
		Máxima deformación (m)	0.075422	0.075478	0.075542	0.075604
		Variación en máx. def. (%)	0.0000	0.0742	0.1591	0.2413
9 Flexionante		Frecuencia (Hz)	1.08005	1.08005	1.08004	1.08004
		Variación en frecuencia (%)	0.0000	0.0000	-0.0009	-0.0009
		Máxima deformación (m)	0.061068	0.061085	0.061104	0.061122
		Variación en máx. def. (%)	0.0000	0.0278	0.0590	0.0884
10 Flexionante		Frecuencia (Hz)	1.17538	1.17536	1.17533	1.17531
		Variación en frecuencia (%)	0.0000	-0.0017	-0.0043	-0.0060
		Máxima deformación (m)	0.057447	0.057446	0.057444	0.057443
		Variación en máx. def. (%)	0.0000	-0.0017	-0.0052	-0.0070
11 Torsional		Frecuencia (Hz)	1.28781	1.28781	1.28780	1.28779
		Variación en frecuencia (%)	0.0000	0.0000	-0.0008	-0.0016
		Máxima deformación (m)	0.073548	0.073556	0.073566	0.073575
		Variación en máx. def. (%)	0.0000	0.0109	0.0245	0.0367
12 Flexionante		Frecuencia (Hz)	1.37790	1.37789	1.37788	1.37787
		Variación en frecuencia (%)	0.0000	-0.0007	-0.0015	-0.0022
		Máxima deformación (m)	0.063200	0.063193	0.063186	0.063179
		Variación en máx. def. (%)	0.0000	-0.0111	-0.0222	-0.0332
13 Torsional		Frecuencia (Hz)	1.41092	1.41092	1.41091	1.41090
		Variación en frecuencia (%)	0.0000	0.0000	-0.0007	-0.0014
		Máxima deformación (m)	0.081040	0.081057	0.081076	0.081096
		Variación en máx. def. (%)	0.0000	0.0210	0.0444	0.0691

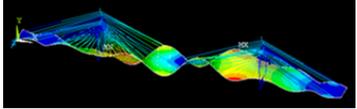
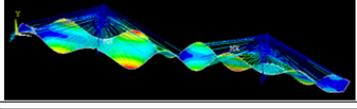
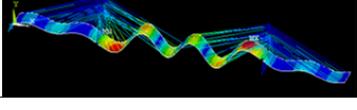
14 Torsional Flexionante		Frecuencia (Hz)	1.49589	1.49587	1.49585	1.49583
		Variación en frecuencia (%)	0.0000	-0.0013	-0.0027	-0.0040
		Máxima deformación (m)	0.053038	0.053043	0.053048	0.053053
		Variación en máx. def. (%)	0.0000	0.0094	0.0189	0.0283
15 Torsional		Frecuencia (Hz)	1.56662	1.56660	1.56658	1.56655
		Variación en frecuencia (%)	0.0000	-0.0013	-0.0026	-0.0045
		Máxima deformación (m)	0.069612	0.069611	0.069609	0.069608
		Variación en máx. def. (%)	0.0000	-0.0014	-0.0043	-0.0057
16 Flexionante		Frecuencia (Hz)	1.60590	1.60590	1.60590	1.60590
		Variación en frecuencia (%)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
		Máxima deformación (m)	0.064119	0.064118	0.064118	0.064118
		Variación en máx. def. (%)	0.0000	-0.0016	-0.0016	-0.0016

Figura 2.2. Análisis modal del PRP con modelo MEF en ANSYS®; señalando en rojo las variaciones máximas de frecuencia natural y deformación para cada caso dañado comparado con el sano.

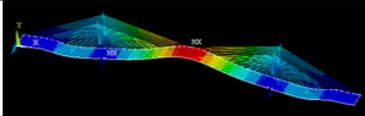
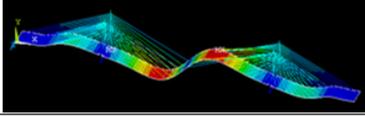
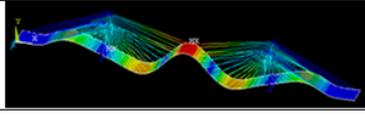
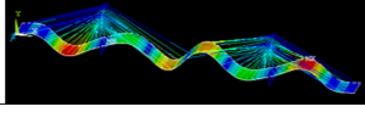
ANÁLISIS MODAL DE PUENTE RÍO PAPALOAPAN CON MODELO MEF-ANSYS Y DATOS EXPERIMENTALES						
Tipo de modo	Frecuencia numérica (Hz)	Forma modal numérica	Frecuencias experimentales (Hz) utilizando la técnica <i>Frequency Domain Decomposition (FDD)</i>			
			Referencia del 2018	Antes del destensado del tirante T6S3 el 16/julio/2019	Después del destensado del tirante T6S3 el 17/julio/2019	Variación en frecuencia antes y después del destensado del T6S3 (%)
1er. Flexionante	0.42363		0.4151	0.4141	0.4102	-0.94%
2do. Flexionante	0.55715		0.5762	0.5626	0.5587	-0.69%
3er. Flexionante	0.80674		0.8135	0.7931	0.7853	-0.98%
4to. Flexionante	0.97209		1.0010	1.0000	0.9923	-0.77%

Figura 2.3. Análisis modal del PRP con modelo MEF en ANSYS® y datos experimentales para los primeros cuatro modos flexionantes.

## 2.3 Método basado en cambios de valores RMS/kurtosis

Los valores de los parámetros estadísticos RMS y kurtosis se obtienen de acuerdo a las ecuaciones 2.1 y 2.2, respectivamente:

$$X_{\text{RMS}} = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

$$X_K = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - X_M)^4}{(N-1)X_{DE}^4} \quad (2.2)$$

donde  $x_i$  simboliza la señal de tiempo o el conjunto de datos analizados con  $N$  muestras,  $X_M$  es la media aritmética y  $X_{DE}$  la desviación estándar.

Para la aplicación de los métodos basados en cambios de los valores RMS y kurtosis se implementó una carga móvil en el modelo MEF del PRP (simulando el paso de un vehículo) y se obtuvieron las respuestas de vibración (tiempo-aceleración).

Primeramente, para analizar daño en el tablero del puente, se simuló un corte de diferente profundidad, reduciendo la sección transversal 10%, 30% y 50% (es decir, 0.10h, 0.30h y 0.50h, respectivamente, donde h es la altura del tablero) al 25% de la longitud del tablero del puente entre torres ( $L = 203$  m) y en una longitud del 5% de la longitud considerada del tablero; mientras que los puntos de medición se establecieron al 25%, 50% y 75% de L.

Por otra parte, para analizar daño en el tirante T6S3 se redujo su tensión en diferentes niveles, tal como se hizo para aplicar el método basado en cambios de parámetros modales, haciendo que trabaje al 70%, 35% y 0% de su tensión (figura 2.4a). Los puntos de medición se establecieron como se muestra en la figura 2.4b, donde el punto de medición S10 corresponde con la ubicación del tirante T6S3.

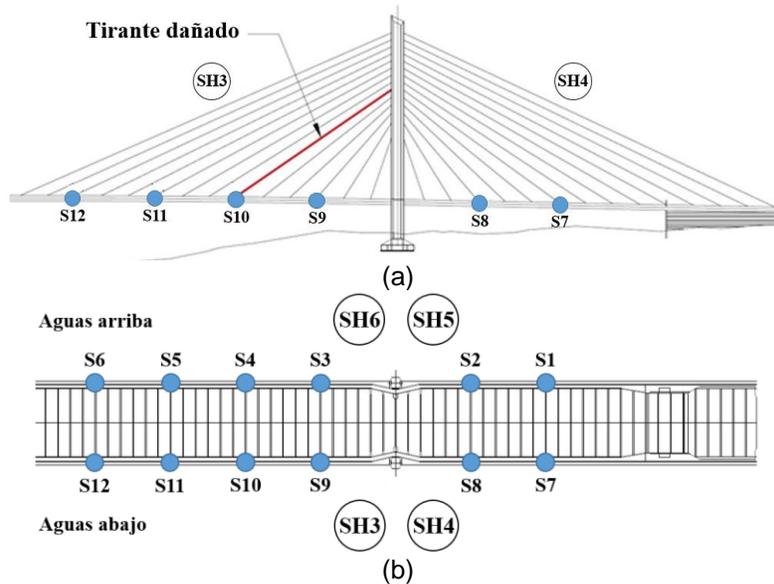
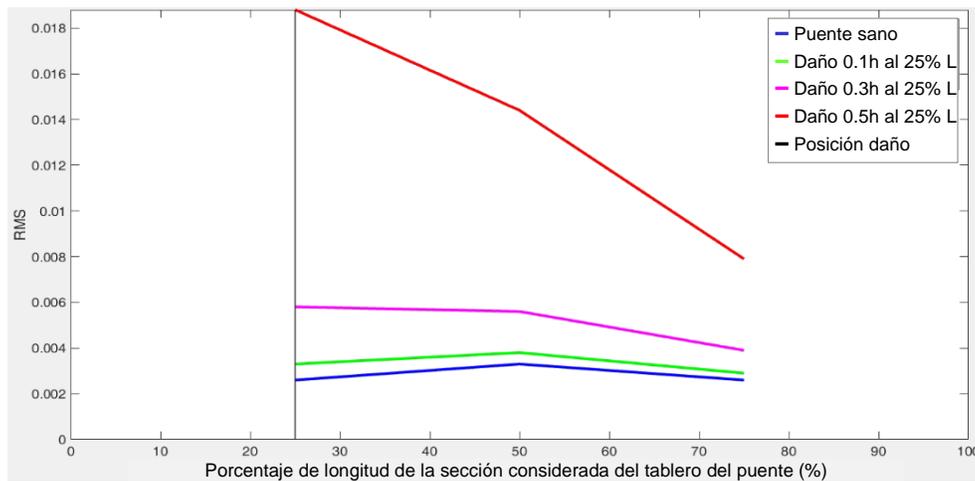


Figura 2.4. Croquis del PRP indicando: (a) ubicación del tirante dañado T6S3 con reducción de tensión y (b) ubicación de los puntos de medición (S1-S12) y semi-arpas (SH3-SH6).

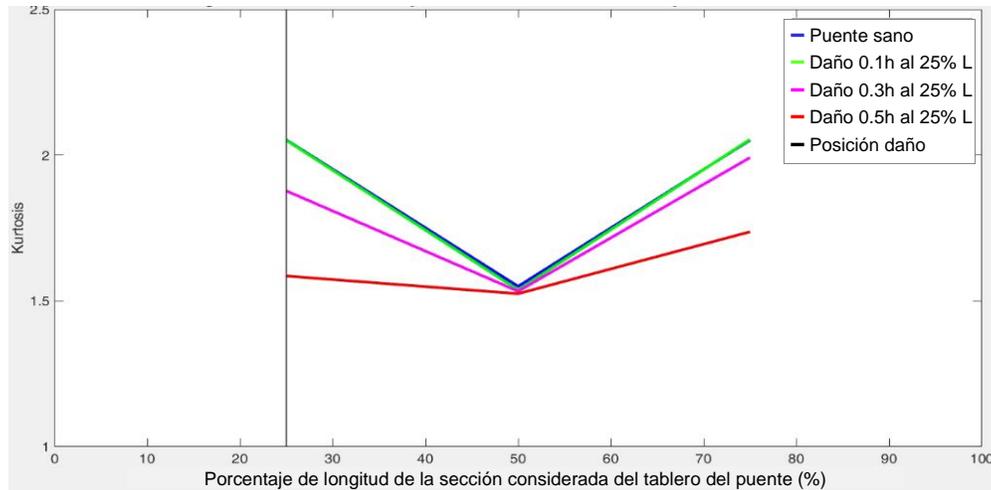
Los valores RMS y kurtosis se obtuvieron para cada respectiva serie de datos (tiempo-aceleración) de cada escenario a analizar.

En la figura 2.5 se puede apreciar que los valores RMS permiten detectar daño, ya que la curva del caso sano siempre está por debajo de las curvas dañadas; además, permiten distinguir entre diferentes severidades de daño debido a que las curvas dañadas se encuentran suficientemente separadas entre sí y los valores RMS para cada punto de medición son mayores conforme el daño se incrementa; no obstante, la localización de daño sólo sería confiable para el caso con la mayor magnitud de daño, ya que para daños menores, el valor RMS más alto podría ser similar para dos ubicaciones diferentes o incluso corresponder con otra ubicación donde no hay daño.



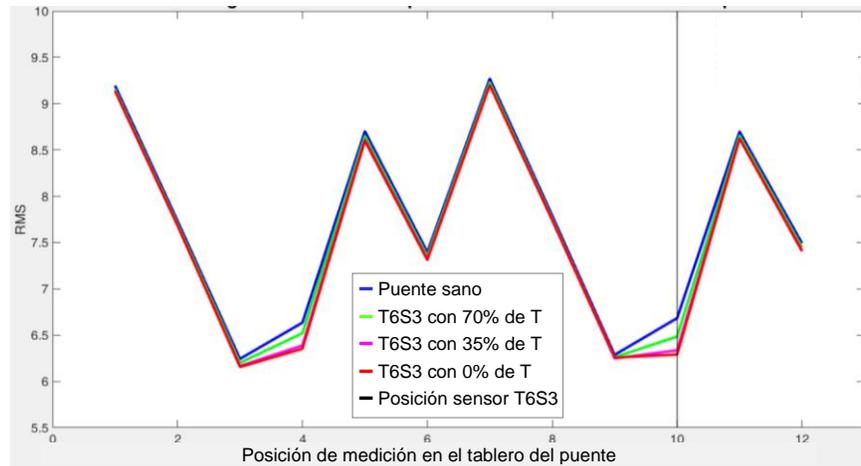
**Figura 2.5. Valores RMS obtenidos en tres posiciones diferentes del tablero del puente (25%, 50% y 75% de L) con simulación MEF para puente sano y puente con tres magnitudes diferentes de daño en tablero al 25% de L (0.1h, 0.3h y 0.5h).**

Por otra parte, en la figura 2.6 se observa que con los valores kurtosis nuevamente se pueden diferenciar las intensidades de daño consideradas; sin embargo, la detección de daño se complica para el caso con el menor daño, ya que su curva y la del caso sano prácticamente son iguales. Finalmente, la localización de daño no es posible con este parámetro, ya que no existe ninguna tendencia definida que permita asociar el valor mínimo o máximo con la ubicación del daño para ningún caso de daño.

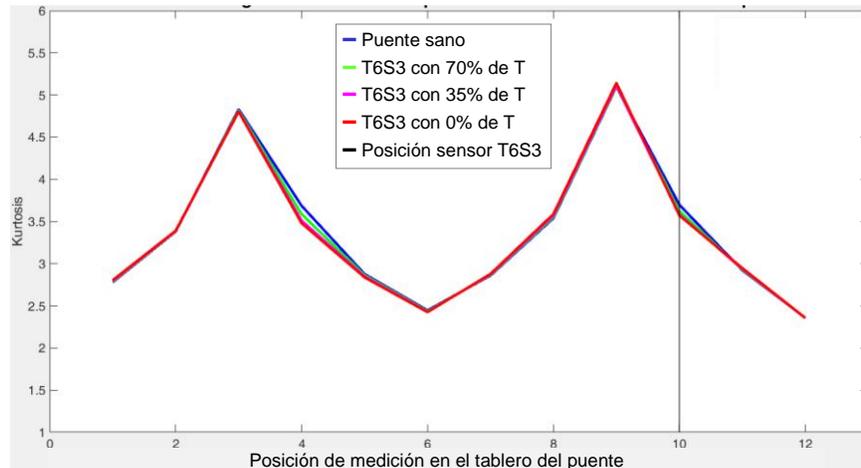


**Figura 2.6. Valores kurtosis obtenidos en tres posiciones diferentes del tablero del puente (25%, 50% y 75% de L) con simulación MEF para puente sano y puente con tres magnitudes diferentes de daño en tablero al 25% de L (0.1h, 0.3h y 0.5h).**

Por último, para el caso de tirante dañado, se puede observar en la figura 2.7 y figura 2.8 que existe una pequeña posibilidad de detectar daño con los valores RMS y kurtosis, respectivamente, si se mide en la zona donde se encuentra el tirante dañado (alrededor de S4 y S10), ya que se presenta una pequeña separación entre curva sana y curvas dañadas en estas posiciones únicamente, mientras que en cualquier otro punto de medición no es posible detectar, localizar ni cuantificar daño. Cabe destacar que esas mismas gráficas presentadas en la figura 2.7 y figura 2.8 se obtuvieron al usar los valores reales del monitoreo del PRP para caso sano y caso sin tirante T6S3 y no fue posible detectar ni localizar daño, por lo que por intereses de brevedad no se presentan esas gráficas experimentales. Asimismo, los resultados del monitoreo real demuestran que la pequeña separación observada en las gráficas numéricas (en la zona del daño) para caso sano y dañados es imposible de conservar en escenarios reales, debido al ruido de las señales y factores ambientales.



**Figura 2.7. Valores RMS obtenidos en doce posiciones diferentes del tablero del puente con simulación MEF para puente sano y puente con tres magnitudes diferentes de daño en tirante T6S3 (trabajando al 70%, 35% y 0% de su tensión).**



**Figura 2.8. Valores kurtosis obtenidos en doce posiciones diferentes del tablero del puente con simulación MEF para puente sano y puente con tres magnitudes diferentes de daño en tirante T6S3 (trabajando al 70%, 35% y 0% de su tensión).**

## 2.4 Conclusiones parciales

Los resultados numéricos y experimentales obtenidos para este capítulo 2 indican que los cambios en parámetros modales no son útiles para detectar daño en puentes atirantados, ya que las formas modales no varían con la presencia de daño, mientras que las frecuencias naturales y deformaciones varían en porcentajes tan pequeños que no pueden ser considerados como indicadores contundentes ni confiables para advertir de la existencia de daño.

Por otra parte, para el caso de daño en el tablero, los valores RMS mostraron resultados numéricos promisorios para detectar daño, localizar daño severo y

cuantificar daño; mientras que los valores kurtosis también pudieron cuantificar daño pero no fueron capaces de detectar el daño más pequeño considerado ni localizar daño sin importar la magnitud. Para el caso de tirante dañado, ninguno de esos dos parámetros estadísticos pudo localizar ni cuantificar daño, y la detección de daño depende de realizar la medición justo en la zona del daño, por lo que no son útiles. Si se toman los valores del monitoreo real del PRP, ni midiendo en la zona del daño se puede detectar el daño (ausencia de tirante) con el cambio de los valores RMS o kurtosis.

Así entonces, los métodos estudiados en este capítulo no presentan garantías para la identificación de daño en puentes atirantados reales y, por tanto, en los siguientes dos capítulos se proponen métodos más sofisticados de detección de daño con resultados alentadores para implementarse en puentes reales.

### 3. Método de acumulación de energía *wavelet* (MAEW)

---

El método de acumulación de energía *wavelet* (MAEW) se desarrolló para identificar daño en puentes y se basa en el post-procesamiento, mediante la transformada *wavelet* continua (*continuous wavelet transform*, CWT), de las señales adquiridas en el puente cuando un vehículo lo cruza. Este método se presentó el año pasado a manera de publicación técnica del IMT [31], en dicha publicación se expone: una abundante revisión del estado del arte en técnicas *wavelets* de detección de daño en estructuras, el fundamento teórico de la CWT, la descripción detallada del modelo numérico MEF, la descripción del MAEW, los resultados de las simulaciones numéricas, los resultados del caso de la falla real y las conclusiones.

Debido a los resultados promisorios que se obtuvieron al aplicar el MAEW tanto de forma numérica como experimental en el PRP, mostrando un gran potencial para detectar, localizar y cuantificar diferentes tipos de daño, se decidió incluir este método en el estudio comparativo propuesto para esta publicación. Todo el desarrollo y aplicación detallada del MAEW puede consultarse en [31], por lo que en este capítulo sólo se presenta un breve resumen de la metodología, resultados más significativos y conclusiones parciales, lo cual sirve como base para la comparativa de métodos realizada en el capítulo 5.

#### 3.1 Metodología

La aplicación paso a paso del MAEW para detección y localización de daño en puentes consiste en:

1. Instrumentar el puente con sensores de vibración distribuidos proporcionalmente a lo largo del tablero.
2. Obtener las respuestas de vibración (desplazamiento o aceleración) para el puente sano (*baseline*) y para la condición actual del puente mientras un vehículo suficientemente pesado cruza con velocidad constante y baja.
3. Aplicar un filtro adecuado para eliminar la mayor cantidad de ruido en las señales (filtro Savitzky-Golay; orden: 2, longitud de ventana: 19).
4. Restar las señales actuales (probablemente dañadas) y las correspondientes señales sanas.
5. Aplicar la CWT y obtener los correspondientes diagramas de colores tridimensionales para las señales sanas y restadas. Se debe utilizar un amplio rango de escala, así como la *mother wavelet* adecuada (*Mexican hat* para el PRP) y el conveniente mapa de colores.

6. Eliminar los efectos de borde extendiendo las señales en ambos lados.
7. Una vez que se detecta un indicio de daño en los diagramas CWT de las señales restadas al compararlos con los de las señales sanas, seleccionar el rango de escala más conveniente.
8. Obtener los diagramas CWT para las señales sanas y restadas sin efectos de borde y para el nuevo rango de escala conveniente (área de interés).
9. Obtener y graficar la energía *wavelet* (EW) para los casos sanos y restados (en cada posición de medición), la cual se calcula a partir de los diagramas CWT mediante el área bajo la curva de los coeficientes a lo largo del rango de escala seleccionado y para cada punto del tablero del puente.
10. Obtener y graficar la EW promedio considerando todas las posiciones de medición para el caso *baseline* y el caso actual (restado).
11. Comparar la EW promedio para el caso sano y el caso actual (restado). Si son similares, el caso actual también estará sano; de lo contrario, si hay un aumento súbito de EW, el caso actual estaría dañado y la posición del daño se determinará por la posición del valor máximo de la cresta de acumulación de EW (correspondiente a la posición del vehículo en el puente).

Cabe señalar que, una vez realizada la caracterización del puente a estudiar y conocidos los efectos de todos los posibles daños peligrosos con este método, los pasos que incluyen la selección conveniente de filtro, rango de escala y *mother wavelet* se eliminarían y el diagnóstico sería más rápido.

## 3.2 Resultados

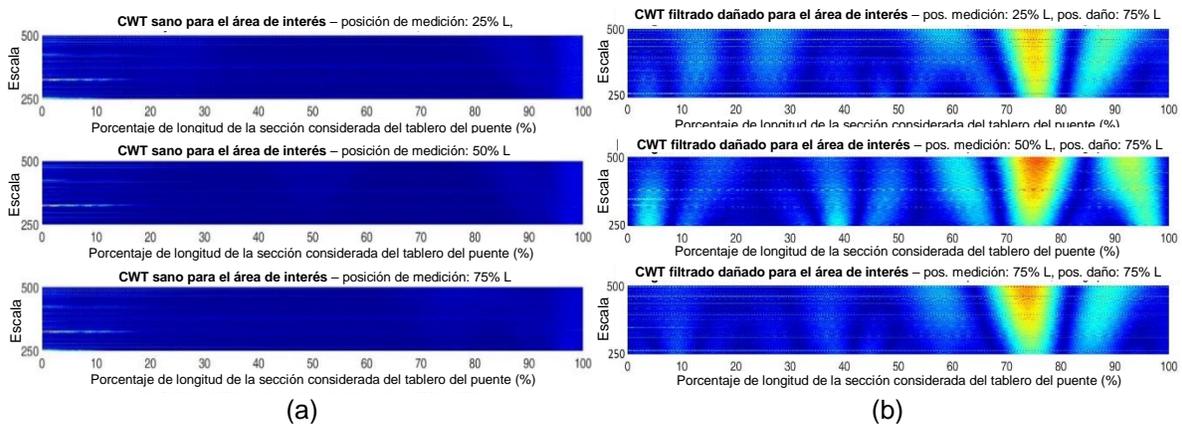
Primeramente, se creó un modelo numérico MEF detallado (usando el programa ANSYS<sup>®</sup>) basado en las características del PRP a fin de estudiar diferentes escenarios de daño, incluido daño en el tablero y daño en los tirantes (simulando en un caso la falla del tirante T1S5 que colapsó en el puente real en el año 2015). Las respuestas transitorias numéricas obtenidas mientras una carga se mueve en diferentes nodos a lo largo del tablero del puente (simulando un vehículo que pasa a través del puente), así como las señales experimentales, se post-procesaron con un código escrito en MATLAB<sup>®</sup>, el cual proporciona la energía *wavelet* (EW) y determina si existe algún daño y su ubicación.

### 3.2.1 Resultados numéricos

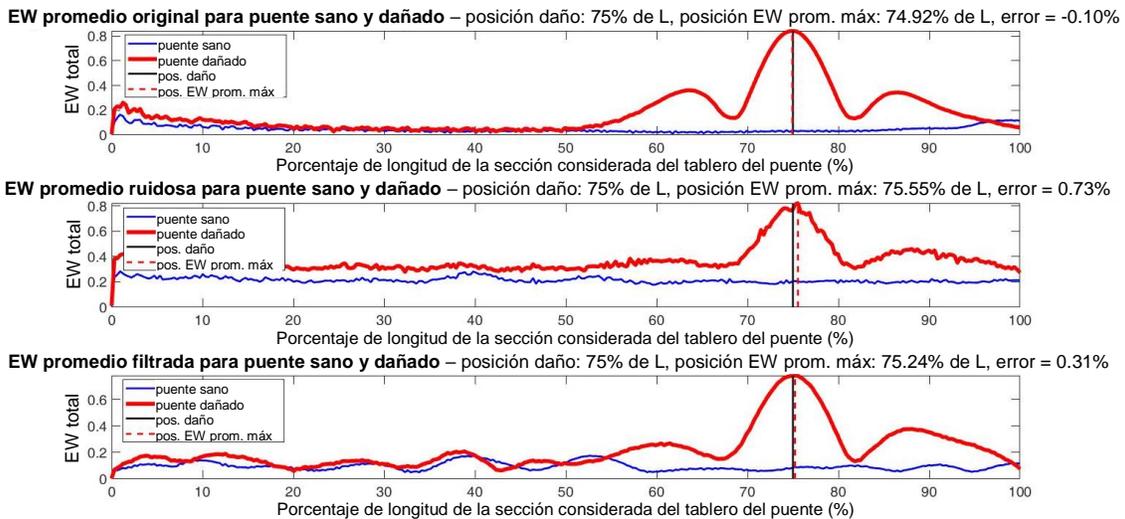
Siguiendo la metodología presentada en la sección 3.1 y aplicándola en el modelo MEF, se puede observar en la figura 3.1a que para el caso de puente sano no existe evidencia de daño en los diagramas CWT para ninguna de las tres posiciones de medición; mientras que para el caso de puente con tablero dañado a 0.75L (simulado al reducir un 30% el área de la sección transversal en el 5% de los 203 m de longitud del tablero del puente entre torres) la presencia del daño es clara, con indicadores evidentes de altos coeficientes *wavelets* (energía) alrededor de la ubicación del daño (ver figura 3.1b). Cabe señalar que la identificación del daño es

posible incluso si las mediciones se alejan significativamente de la posición del daño; sin embargo, cuanto más cerca esté la medición a la posición del daño, mayor será la energía.

Por otra parte, en la figura 3.2 se muestra la correspondiente EW promedio para puente sano y puente con tablero dañado a 0.75L para los tres escenarios de señales (original, ruidosa y filtrada), indicando el respectivo porcentaje de error en la localización del daño para el caso dañado. En esa figura se puede observar que la EW para los casos sanos es muy baja y plana; mientras que, para los casos dañados, la acumulación de EW siempre está alrededor de la ubicación del daño y su magnitud es mucho mayor en comparación con los casos sanos. Los porcentajes absolutos de error para la identificación de daño fueron 0.10%, 0.73% y 0.31% para las señales originales, ruidosas y filtradas, respectivamente.

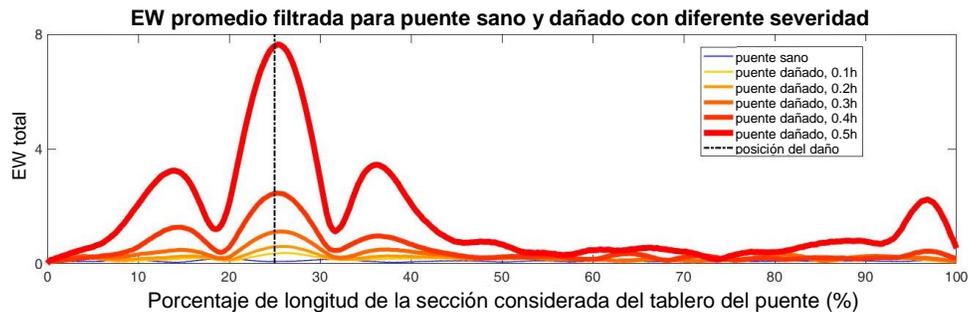


**Figura 3.1. Diagramas CWT a partir de las señales de aceleración para el área de interés para: (a) puente sano y (b) puente con tablero dañado a 0.75L. Tres diferentes posiciones de medición para cada caso (de arriba a abajo: 0.25L, 0.50L y 0.75L).**



**Figura 3.2. EW total promedio a partir de las señales de aceleración para puente sano y puente con tablero dañado a 0.75L. Tres diferentes condiciones de las señales (de arriba a abajo: original, ruidosa y filtrada).**

Asimismo, para cuantificar la severidad del daño y estudiar otra posición de daño, cinco magnitudes diferentes de este tipo de daño en el tablero del puente se simularon al 25% de L, reduciendo la sección transversal 10%, 20%, 30%, 40% y 50% en la zona del daño (es decir, 0.10h, 0.20h, 0.30h, 0.40h y 0.50h, donde h es la altura del tablero). En la figura 3.3 se muestra la EW promedio sana y todas las EW promedio dañadas en la misma gráfica para una visualización más fácil del impacto de la magnitud del daño en la EW y la sensibilidad de este método. Todas las magnitudes de daño pueden diferenciarse claramente entre sí y también respecto al caso sano. Además, resulta evidente que la EW se incrementa a medida que aumenta la gravedad del daño. Por lo que con esta gráfica se demuestra que con el MAEW se puede detectar, localizar y cuantificar daño.



**Figura 3.3. EW total promedio a partir de las señales de aceleración filtradas para puente sano y puente con tablero dañado a 0.25L con diferente severidad.**

Finalmente, con respecto a la parte numérica de esta investigación, se estudió otro tipo de daño (tirante dañado), analizando para ello tres casos: puente sano, puente con tirante dañado T1S5 y puente con tirante dañado T10S7; considerando la longitud total del puente (407.21 m) y estableciendo los puntos de medición a 0.33L, 0.50L y 0.66L.

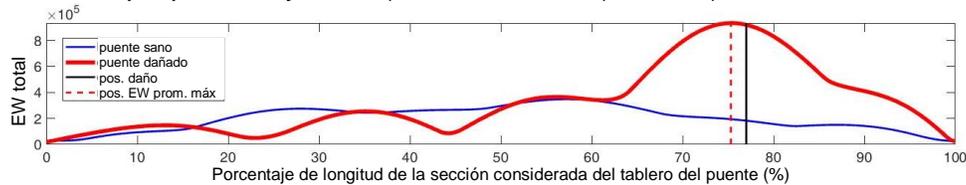
El caso del tirante dañado T1S5 corresponde con el caso real analizado en la siguiente sección, donde el tirante 1 de la semi-arpa 5 colapsó y cuya falla se describió en el capítulo 1. El anclaje de este tirante en el tablero (de acuerdo con la vista lateral de la figura 1.2 de izquierda a derecha) se encuentra a 0.77L y no se definió un punto de medición numérico en esta ubicación (el más cercano a 0.66L que representa 42 m de distancia). La tensión de este tirante se redujo en un 40%.

En cuanto al tirante dañado T10S7, el tirante número 10 de la semi-arpa 7 está anclado a 0.42L (prácticamente entre el primer y segundo punto de medición numérico con alrededor de 32 m de distancia) y su tensión se redujo en un 50%. El propósito de este último caso fue analizar otra ubicación de tirante dañado y otra magnitud de pérdida de tensión.

En la figura 3.4, se presenta la EW total promedio y filtrada para cada caso de tirante dañado comparado con el caso sano. Para el tirante dañado T1S5 (a 0.77L), el porcentaje de error en la localización del daño fue de 2.20%; por otro lado, la máxima EW de la curva dañada fue aproximadamente 2.5 veces la máxima EW del caso sano y la misma magnitud (2.5) mayor con respecto a la segunda cresta más

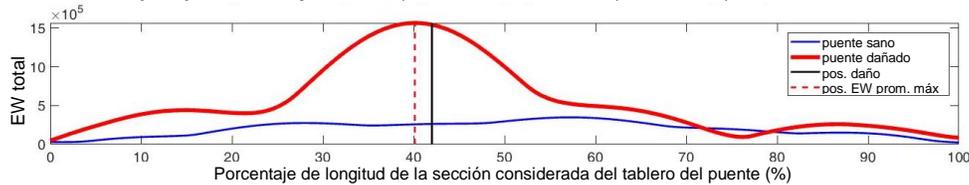
grande de la misma curva dañada; es decir, la cresta de máxima acumulación de EW que indica la ubicación del daño a  $0.77L$  es lo suficientemente alta como para distinguirse de la segunda cresta más alta de la misma curva y la primera cresta más alta de la curva sana. Para el caso de tirante dañado a  $0.42L$ , la máxima EW aumentó 1.6 veces respecto al valor correspondiente para tirante dañado a  $0.77L$ , lo que puede deberse a la posición más crítica de este tirante y a un mayor porcentaje de pérdida de tensión; el porcentaje de error en su localización de daño también fue muy aceptable (4.47%) considerando que se agregó ruido a las señales y luego se filtraron. Así entonces, también se puede detectar y localizar tirantes dañados en diferentes posiciones y con diferente magnitud de daño aplicando el MAEW.

EW promedio filtrada para puente sano y dañado – posición daño: 77% de L, posición EW prom. máx: 75.31% de L, error = -2.20%



(a)

EW promedio filtrada para puente sano y dañado – posición daño: 42% de L, posición EW prom. máx: 40.12% de L, error = -4.47%



(b)

Figura 3.4. EW total promedio a partir de las señales de desplazamiento filtradas para: (a) puente sano vs. puente con tirante dañado a  $0.77L$  y (b) puente sano vs. puente con tirante dañado a  $0.42L$ .

### 3.2.2 Resultados experimentales en el PRP

Para estudiar un caso de falla real en el PRP, se analizaron los datos disponibles más útiles adquiridos durante el monitoreo de la segunda falla principal del PRP ocurrida el 10 de junio de 2015 (colapso del tirante T1S5), y se compararon con los respectivos del puente cuando se aseguró que estuviera sano (*baseline*) el 22 de agosto de 2014. Estos datos corresponden con las mediciones con tráfico aleatorio obtenidas en el tablero con galgas extensométricas (125 Hz de frecuencia de muestreo) en los puntos de medición R1, R2 y R4 (ver figura 1.5).

Las EW totales obtenidas de los correspondientes diagramas CWT para cada punto de medición de caso sano y dañado se muestran en la figura 3.5; mientras que en la figura 3.6, se expone en la misma gráfica la EW total promedio correspondiente para el caso sano y para el caso dañado. Las EW para mediciones individuales son

claramente mayores para los casos dañados (figura 3.5) y la máxima EW total promedio es casi cinco veces mayor para el caso dañado con respecto al caso sano (figura 3.6). Además, se puede notar en la figura 3.5 que la mayor EW para el caso dañado se obtuvo para el punto de medición más cercano al daño (R2), es decir, la ubicación de esta medición era la más cercana al anclaje del tirante T1S5 en el tablero. Estos resultados tuvieron que alertar de que el puente estaba dañado debido al incremento significativo de la EW con respecto al caso *baseline* y tuvieron que sugerir que el daño estaba ubicado alrededor de R2. Por tanto, independientemente de la aleatoriedad del tráfico, se observaron EW significativamente mayores para el puente dañado y la detección y localización del daño fueron posibles.

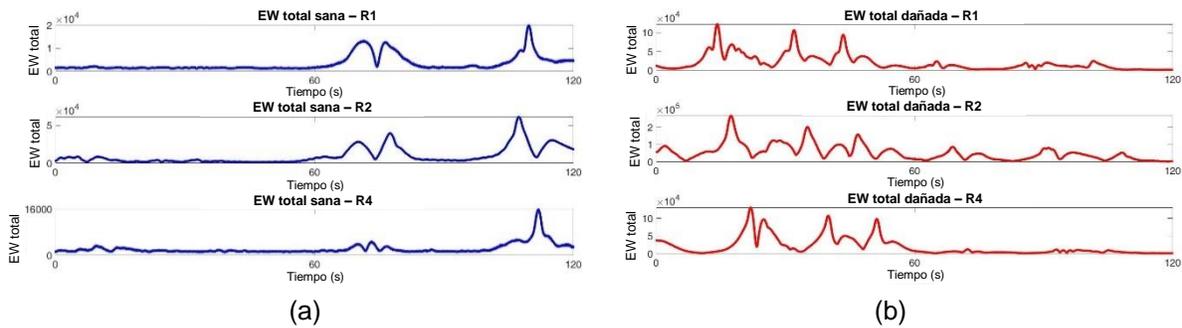


Figura 3.5. EW total a partir de las señales experimentales filtradas para: (a) puente sano y (b) puente con tirante dañado T1S5. Tres diferentes posiciones de medición para cada caso (de arriba a abajo: R1, R2 y R4).



Figura 3.6. EW total promedio a partir de las señales experimentales filtradas para puente sano vs. puente con tirante dañado T1S5.

### 3.3 Conclusiones parciales

La aplicación del MAEW en un detallado modelo MEF de un puente atirantado (PRP) proporcionó resultados promisorios para detectar diferentes tipos de daño, tales como daño en el tablero y tirantes. El uso de pocos puntos de medición distribuidos a lo largo de un puente para detectar daño, junto con la precisión en la localización del daño, hacen que este método sea atractivo para implementarse en

puentes reales con un bajo costo. Adicionalmente, se demostró la sensibilidad de este método para detectar daño en las primeras etapas y la capacidad de diferenciar diversas posiciones y severidades de daño. Los resultados obtenidos con señales reales adquiridas del PRP sano y dañado sugirieron que el MAEW puede evitar colapsos de puentes, ya que se detectó y localizó un tirante dañado incluso cuando las señales no eran las más recomendables a partir de una prueba controlada.



## 4. Método basado en el índice de entropía de Shannon (MIES)

---

En este capítulo se presenta un nuevo método basado en el índice de entropía de Shannon (MIES), desarrollado con el objetivo de detectar y localizar daño (tirante dañado) en puentes atirantados y el cual se aplica en el PRP para su validación. Los resultados promisorios obtenidos en un puente real, mostrando una alta eficiencia para detectar daño y gran precisión para localizarlo, lo sitúa como uno de los métodos más prometedores para ser comparado en el siguiente capítulo.

### 4.1 Introducción

En los últimos años, la entropía de Shannon, una medida no lineal, se ha utilizado para diagnosticar: (a) enfermedades en humanos [37, 38], (b) problemas en sistemas eléctricos [39, 40], (c) el estado de salud de estructuras y modelos académicos [41, 42], entre otras aplicaciones. La entropía de Shannon mide la incertidumbre en una variable aleatoria; en otras palabras, la entropía de Shannon otorga una medida de la cantidad de información contenida en la ocurrencia de un evento [43]. Por lo tanto, puede ser una medida no lineal confiable para detectar y localizar daño en una estructura civil, ya que las señales adquiridas cambian según el nivel de daño y su ubicación, produciendo una variación en el valor de entropía de Shannon [41, 42, 44–48].

En este capítulo 4 se presenta el desarrollo y aplicación del método basado en el índice de entropía de Shannon (MIES), cuya principal contribución es la integración del índice de entropía de Shannon (IES) y un clasificador de lógica difusa (CLD) para detectar y localizar la pérdida de un tirante en puentes atirantados expuestos a vibraciones ambientales. El IES se emplea para encontrar patrones característicos en las señales de vibración asociados al daño estructural, los cuales se pueden usar para la detección de daño. Posteriormente, se propone un nuevo índice de daño estructural (un índice estadístico basado en los valores IES estimados) y un CLD que se utiliza como un algoritmo de reconocimiento de patrones para determinar la condición del puente de manera automática. Además, la ubicación del daño se determina de acuerdo con los cambios de los valores IES estimados y un criterio llamado distribución normal estándar (DNE). Para validar la metodología propuesta, se analizan los datos de vibración adquiridos experimentalmente en el puente atirantado Puente Río Papaloapan (PRP). Los resultados demuestran la gran capacidad y eficiencia del método propuesto para detectar y localizar un daño en el puente atirantado incluso con el alto nivel de ruido encontrado en las señales de vibración medidas, ya que se obtiene un 93.3% de eficiencia en la detección de daño con un 100% de eficiencia en la localización.

## 4.2 Metodología

La figura 4.1 ilustra un diagrama esquemático general de la metodología propuesta para detectar y localizar un daño en un puente atirantado. Primeramente, las respuestas de vibración para ambas condiciones, sana y dañada (pérdida de tirante), se miden en un puente atirantado expuesto a vibraciones ambientales producidas principalmente por el tráfico y el viento. Posteriormente, las señales de vibración medidas se analizan por medio del IES para identificar características adecuadas con la capacidad de evaluar la condición del puente. Para determinar si el puente atirantado presenta algún daño o no, se evalúan 17 índices estadísticos (IE) para relacionar los valores IES estimados por todos los sensores con la condición del puente. En seguida, se emplea el método de Kruskal-Wallis (MKW) para definir los IE más útiles para evaluar la condición global del puente. Luego, se realiza una reducción de patrones característicos de acuerdo con los resultados de MKW. Finalmente, los IE seleccionados se utilizan para configurar un CLD para determinar la condición del puente automáticamente. Por otro lado, para la localización de la zona dañada, los valores IES calculados se evalúan mediante el criterio DNE. Los pasos principales de la metodología propuesta se describen en las siguientes subsecciones.

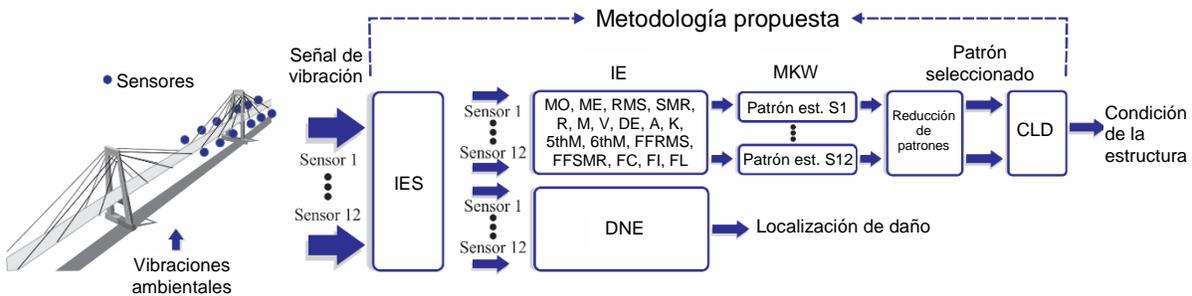


Figura 4.1. Diagrama esquemático del MIES.

### 4.2.1 Índice de entropía de Shannon

El índice de entropía de Shannon (IES) es una medida no lineal desarrollada por Shannon [43] para cuantificar la complejidad y la incertidumbre encontradas en una señal de tiempo. IES es adecuado para analizar señales en el dominio del tiempo con ruido y con propiedades no estacionarias, como las medidas en estructuras civiles, en especial las grandes [49], por lo que es una herramienta adecuada para evaluar el estado de salud de las estructuras civiles, ya que su valor puede variar según las alteraciones o cambios medidos en la respuesta dinámica [50]. Para medir la complejidad de una señal de tiempo  $X$ , el IES se calcula de la siguiente manera:

$$IES(X) = -\sum_{i=1}^K p(x_i) \log_2 [p(x_i)] \quad (4.1)$$

donde  $p(x_i)$  representa la probabilidad que puede tomar una señal de tiempo  $X$  según sus resultados  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_K$ .

## 4.2.2 Detección de daño

Una estructura civil cambia sus propiedades estructurales (por ejemplo, rigidez, amortiguamiento, formas modales, etc.) cuando presenta un daño, lo cual puede medirse en su respuesta estructural [51]. Por lo tanto, la ideología de investigación propuesta es que los valores IES obtenidos en todos los sensores pueden permanecer dentro de un rango cercano cuando la estructura está sana. En este sentido, es importante proponer un método para evaluar de manera conjunta los valores IES estimados por todos los sensores con el fin de determinar correctamente el estado de la estructura.

### 4.2.2.1 Índices estadísticos

Durante los últimos años, los IE (por ejemplo, kurtosis, asimetría, varianza, etc.) han demostrado ser herramientas adecuadas para medir varias propiedades en un conjunto de datos (es decir, dispersión, rango de valores, máximo, convergencia, entre otras propiedades) [52]. Los IE presentan grandes ventajas como: (1) baja carga computacional y (2) no se requiere transformación de dominio, una característica esencial en un esquema SHM que permite calcular los resultados en tiempo real [53]. Por estas razones, diversos IE (es decir, modo (MO), mediana (ME), *root mean square* (RMS), *square mean root* (SMR), rango (R), media (M), varianza (V), desviación estándar (DE), asimetría (A), kurtosis (K), quinto momento (5thM), sexto momento (6thM), factor de forma RMS (FFRMS), factor de forma SMR (FFSMR), factor de cresta (FC), factor de impulso (FI) y factor de latitud (FL)), los más representativos, se investigan con el objetivo de determinar cuáles son los más capaces para obtener las características principales de los valores IES que permitan evaluar el estado de salud del puente atirantado [54]. La tabla 4.1 resume los IE investigados en este estudio, así como sus correspondientes formulaciones matemáticas, donde  $x_i$  simboliza la señal de tiempo o el conjunto de datos analizados con N muestras.

**Tabla 4.1. Índices estadísticos examinados para la obtención de características principales de los valores IES.**

Índices estadísticos examinados	
Índice estadístico (IE)	Ecuación
Modo (MO)	$X_{MO} = \text{mode}(x_i)$ (1)
Mediana (ME)	$X_{ME} = \text{magnitudo} \left( \frac{N+1}{2} \right)$ (2)
<i>Root mean square</i> (RMS)	$X_{RMS} = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2 \right)^{\frac{1}{2}}$ (3)
<i>Square mean root</i> (SMR)	$X_{SMR} = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N  x_i ^{\frac{1}{2}} \right)^2$ (4)

Rango (R)	$X_R = \max(x_i) - \min(x_i)$	(5)
Media (M)	$X_M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$	(6)
Varianza (V)	$X_{V^2} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N  x_i - X_M ^2$	(7)
Desviación estándar (DE)	$X_{DE} = \sqrt{X_{V^2}}$	(8)
Asimetría (A)	$X_A = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - X_M)^3}{(N-1)X_{DE}^3}$	(9)
Kurtosis (K)	$X_K = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - X_M)^4}{(N-1)X_{DE}^4}$	(10)
Quinto momento (5thM)	$X_{5thM} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - X_M)^5}{(N-1)X_{DE}^5}$	(11)
Sexto momento (6thM)	$X_{6thM} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - X_M)^6}{(N-1)X_{DE}^6}$	(12)
Factor de forma RMS (FFRMS)	$X_{FFRMS} = \frac{X_{RMS}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N  x_i }$	(13)
Factor de forma SMR (FFSMR)	$X_{FFSMR} = \frac{X_{SMR}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N  x_i }$	(14)
Factor de cresta (FC)	$X_{FC} = \frac{\max( x_i )}{X_{RMS}}$	(15)
Factor de impulso (FI)	$X_{FI} = \frac{\max( x_i )}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N  x_i }$	(16)
Factor de latitud (FL)	$X_{FL} = \frac{\max( x_i )}{X_{SMR}}$	(17)

#### 4.2.2.2 Método Kruskal-Wallis

Debido a que los IE calculan diferentes patrones para un conjunto de datos, es de vital importancia investigar sus capacidades discriminatorias individuales a fin de seleccionar los más útiles para evaluar correctamente el estado de salud del puente atirantado. En este sentido, el MKW proporciona un análisis estadístico no paramétrico confiable de los diversos patrones o conjuntos de características para determinar cuáles son los más significativos estadísticamente [55]. Para realizar esta tarea, el MKW estima un valor de probabilidad, valor-p, de acuerdo con los valores de la mediana de dos o más conjuntos de datos [56]. El valor-p, que es un valor escalar, varía entre 0 y 1, lo que indica que la característica analizada presenta una alta y baja capacidad para asociarse con el fenómeno estudiado [57]. Por esta razón, el MKW es una herramienta adecuada para determinar los IE más útiles que permiten distinguir correctamente entre un puente sano y dañado. Una vez que se obtienen los IE más útiles; se puede aplicar un algoritmo de reconocimiento de patrones.

#### 4.2.2.3 Clasificador de lógica difusa

En la literatura existen muchos algoritmos de reconocimiento de patrones tales como redes neuronales, árboles de decisión, máquinas de vectores de soporte, sistemas de lógica difusa, entre otros [58]. Aunque todos ellos han mostrado resultados promisorios en muchos campos diferentes, se han preferido los CLD cuando existe un conocimiento previo a cerca de los datos analizados [59]. Este conocimiento se puede utilizar para construir un CLD simple y eficiente.

En general, un CLD consta de cuatro etapas: fuzzificación, reglas, mecanismo de inferencia y defuzzificación [60]. El proceso de fuzzificación convierte las entradas, por ejemplo, los IE, en información que puede ser manejada por el mecanismo de inferencia. Esta información suele estar representada por variables lingüísticas que se cuantifican mediante funciones de pertenencia. Las funciones de pertenencia pueden verse como una extensión de la teoría de conjuntos clásica. Existen diferentes funciones de pertenencia, por ejemplo, trapezoidal, gaussiana, triangular y combinación gaussiana (ver figura 4.2), entre otras; sin embargo, su selección depende tanto de la experiencia del usuario como de la aplicación. La etapa de reglas es un conjunto de decisiones “si-entonces” que caracterizan la falta de claridad de un conjunto difuso con un número real a procesar. En otras palabras, esta etapa describe el conocimiento experto para realizar el procedimiento de clasificación. El mecanismo de inferencia utiliza la información contenida en las reglas para llevar a cabo la clasificación, es decir, la entrada se asigna a la clase a la que pertenece. Finalmente, en la defuzzificación, la decisión que toma el mecanismo de inferencia se convierte en información comprensible para el usuario, indicando si el puente está sano o dañado.

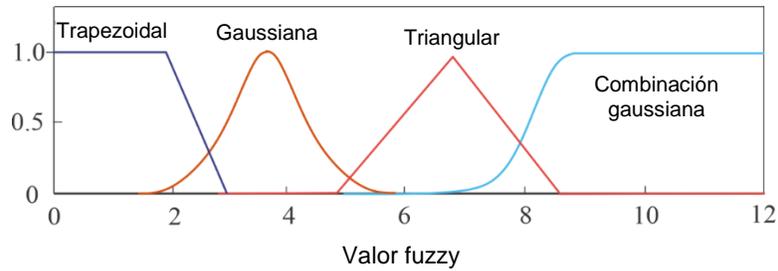


Figura 4.2. Tipos de funciones de pertenencia.

### 4.2.3 Localización de daño

Si el CLD detecta una condición de daño, se lleva a cabo la etapa de localización del daño en la metodología propuesta (ver figura 4.1). La figura 4.3 muestra el procedimiento de localización de daño de una forma más detallada. Como se puede observar, se calculan los IES para las doce señales de vibración (doce sensores). Posteriormente, se calcula el criterio DNE, el cual se propone para localizar el daño. Este criterio consiste en calcular la media ( $\mu$ ) y la desviación estándar ( $\sigma$ ) de los valores del IES. Finalmente, la señal de vibración o sensor que genera el valor máximo de IES, basado en la regla  $3\sigma$ , indicará la ubicación del daño. La regla  $3\sigma$  establece que para una distribución normal, el 68.27%, 95.45% y 99.70% de los datos observados estarán dentro de  $1\sigma$ ,  $2\sigma$ ,  $3\sigma$  de  $\mu$  [61], respectivamente. Por lo tanto, el valor máximo de IES contenido dentro de la banda de  $3\sigma$  se elige como el punto de daño ya que tiene la mayor probabilidad como se muestra en la figura 4.3b.

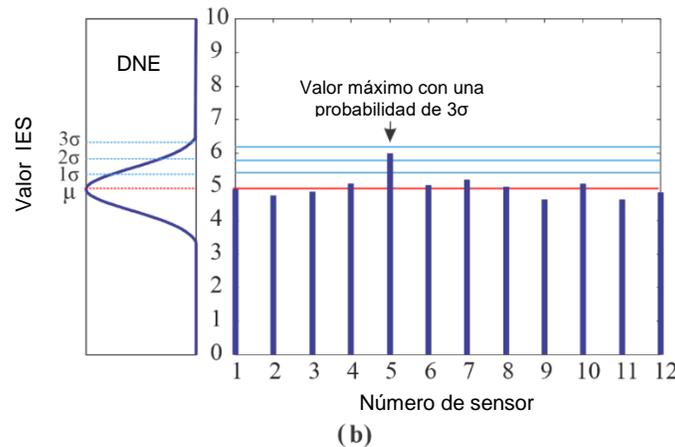
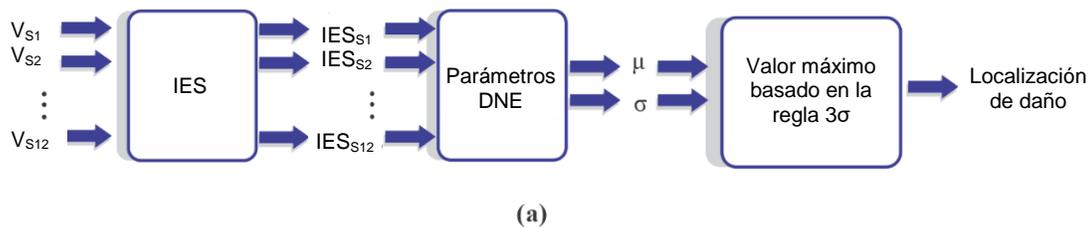


Figura 4.3. (a) Diagrama de flujo para localización de daño y (b) localización de daño basada en la regla  $3\sigma$ .

### 4.3 Aplicación en un puente atirantado

A fin de validar la funcionalidad del método propuesto para la detección y localización de daño en una estructura de la vida real, se usaron los datos adquiridos experimentalmente en el Puente Río Papaloapan (PRP), ver figura 1.1 y figura 1.2.

En particular, durante el mantenimiento del PRP en el año 2019, se monitoreó la respuesta vibratoria del puente en dirección vertical mediante doce acelerómetros inalámbricos fabricados por G-Link-LXRS<sup>®</sup> con un rango de medición de  $\pm 2$  g, colocados en el tablero de las semi-arpas 3, 4, 5 y 6, los cuales se indican con círculos azules en la figura 4.4. Por un lado, para medir la condición sana del puente, se monitoreó la respuesta vibratoria de dicho puente sujeto a excitaciones ambientales (por ejemplo, viento, tráfico y paso de peatones) durante 30 minutos usando una frecuencia de muestreo de 64 Hz, resultando en 115,200 muestras por sensor. Por otro lado, para generar una condición de daño en el puente, se retiró por completo el tirante 6 de la semi-arpa 3 (T6S3), ver figura 4.5a, el cual se representa por una línea roja en la figura 4.5b. Esta segunda condición se monitoreó usando el mismo arreglo experimental de la condición sana.

Cabe destacar que sólo existe un conjunto de datos para cada condición del puente; por lo tanto, los datos se dividen en segmentos de 1,920 muestras (60 segundos) para obtener una información estadística significativa, es decir, 30 pruebas para la condición sana y 30 pruebas para la condición de daño.

En la figura 4.6 se muestran las fotografías de uno de los acelerómetros colocado en el tablero del puente aguas arriba mientras estaba adquiriendo datos con tráfico aleatorio para el escenario dañado (tirante T6S3 removido).

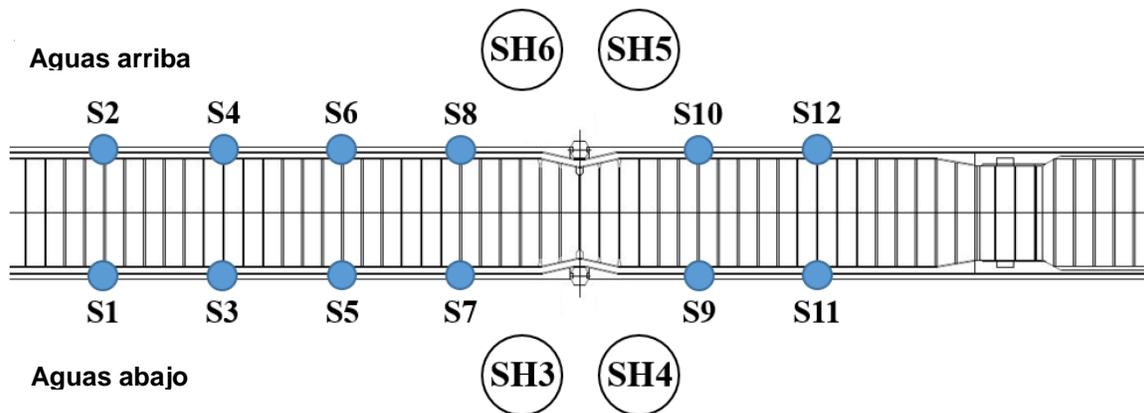
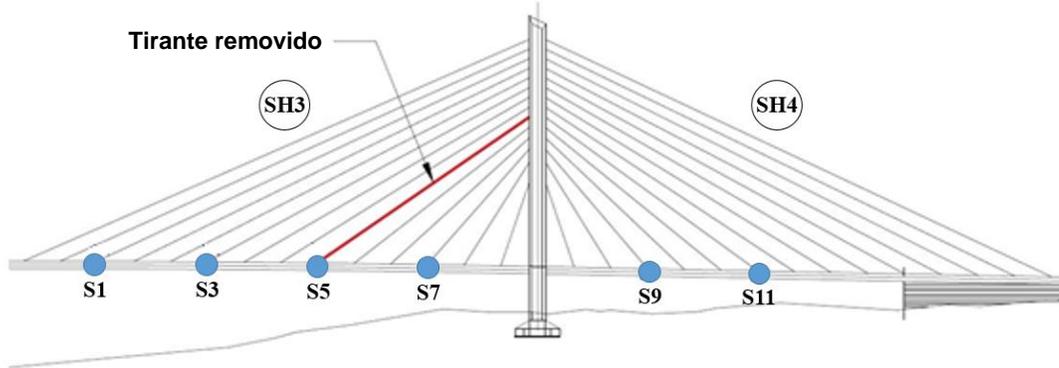


Figura 4.4. Ubicación de los sensores usados para monitorear el comportamiento del puente (sensores: S1-S12; semi-arpas: SH3-SH6).



(a)



(b)

Figura 4.5. Tirante removido para generar la condición de daño: (a) condición real y (b) dibujo esquemático.



Figura 4.6. Acelerómetro colocado en el tablero del puente aguas arriba y adquiriendo datos con tráfico aleatorio.

## 4.4 Resultados

Siguiendo los pasos de la metodología propuesta, se analizan las vibraciones medidas bajo las dos condiciones del puente atirantado (sano y con tirante suelto) mediante el IES.

La figura 4.7 ilustra las vibraciones registradas por los doce sensores para la condición sana y dañada con tirante removido. De acuerdo con esta figura, es importante mencionar que no se aprecian visualmente variaciones o cambios significativos entre las dos condiciones debido a que las vibraciones medidas exhiben un comportamiento caótico o no estacionario, limitando una correcta identificación de patrones o características con la capacidad de determinar la condición del puente.

Por lo tanto, esta investigación proporciona una nueva metodología de evaluación asistida por computadora para revelar patrones o características capaces de determinar la condición del puente.

Una vez analizadas las respuestas de vibración del puente atirantado para ambas condiciones mediante el IES, se procesan los datos usando diversos IE para evaluar de manera conjunta los valores IES estimados para todos los sensores (doce sensores), con el fin de determinar correctamente la condición de la estructura.

La figura 4.8 ilustra la distribución de los valores IES estimados para todos los sensores y ambas condiciones del puente. De acuerdo a esta figura, los valores IES estimados para todos los sensores presentan rangos similares cuando la estructura está sana; por otro lado, cuando la estructura está dañada (tirante suelto), los valores IES para todos los sensores presentan una ligera variación con respecto al estado anterior (sano). Por lo tanto, se investigan diecisiete IE con el fin de evaluar de manera conjunta los valores IES estimados para todos los sensores para establecer el estado de la estructura.

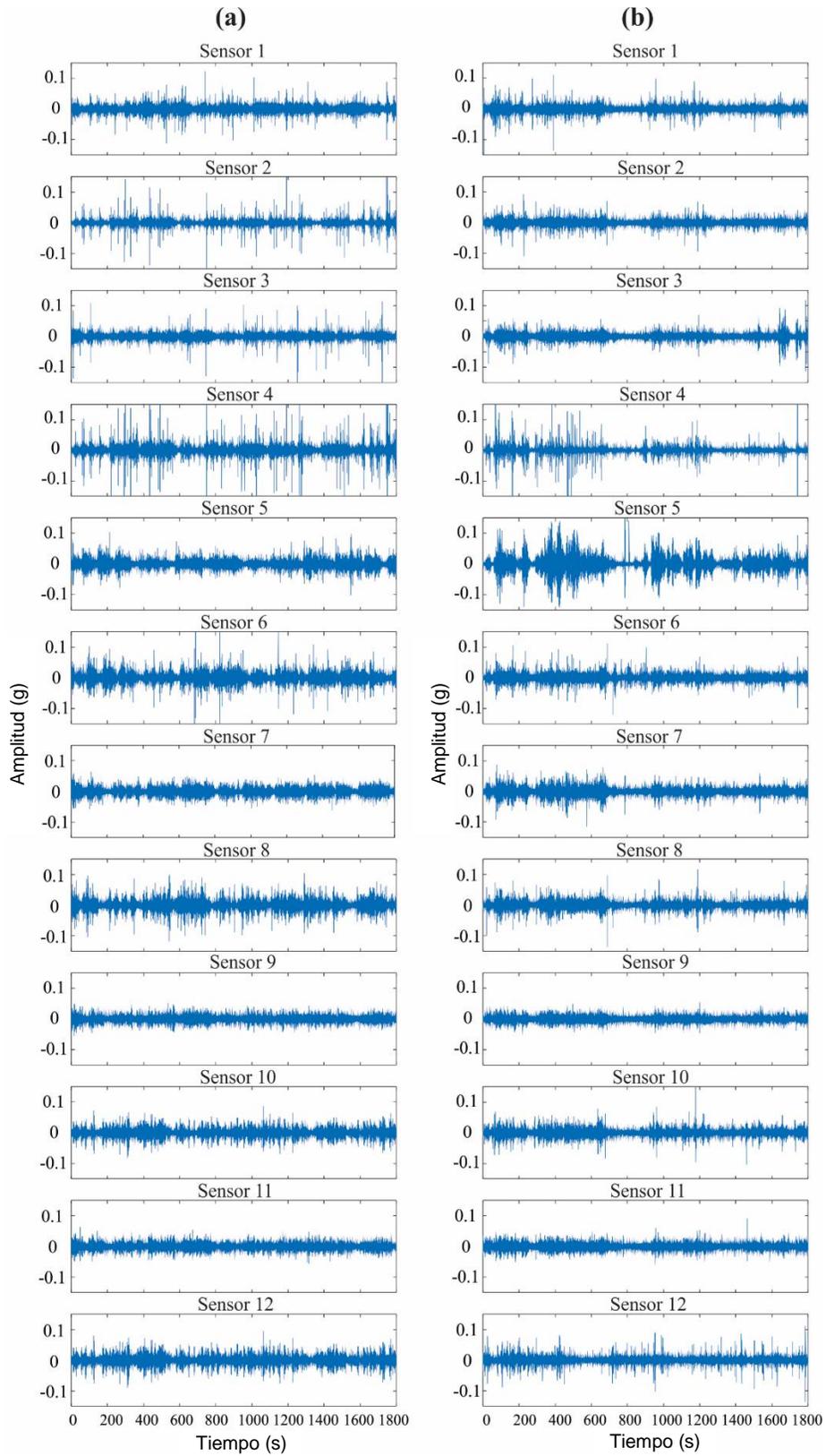
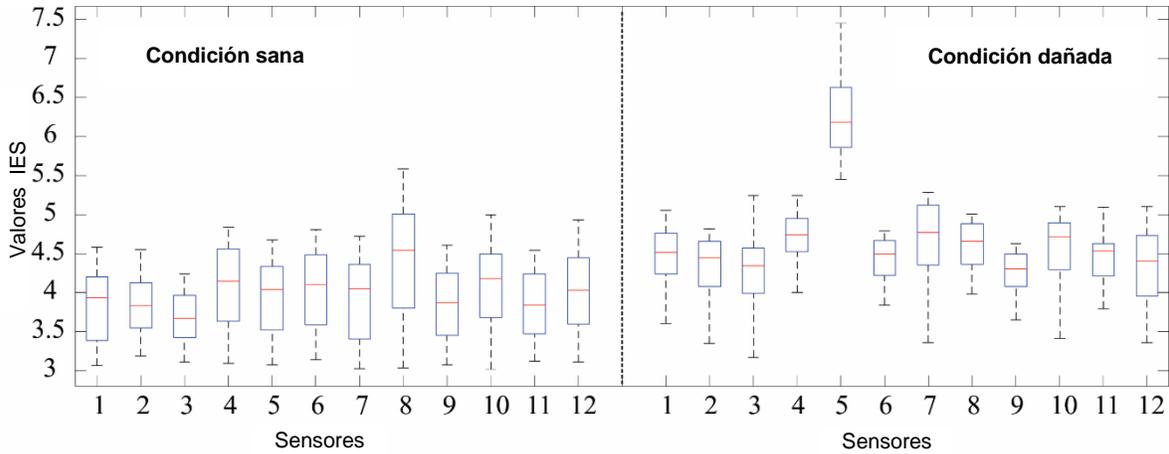


Figura 4.7. Señales de vibración medidas por doce sensores para: (a) condición sana y (b) condición dañada (tirante removido).



**Figura 4.8. Distribución de los valores IES estimados para doce sensores del puente en condición sana y dañada.**

A fin de identificar los IE más útiles para determinar la condición del puente, éstos se evalúan utilizando el MKW. La figura 4.9 presenta la distribución de datos estimada aplicando el MKW para la condición sana (indicada por la letra H en la figura) y dañada (indicada por la letra D en la figura) y los diecisiete IE. En base a esta figura y los valores-p estimados por el MKW, es posible identificar que la DE y el FFRMS, que se destacan en color gris en la figura, presentan la mayor separación entre dos condiciones de puente (se obtiene un traslape mínimo) así como los valores-p más bajos, lo que indica que son los más adecuados para evaluar el estado de salud del puente. Por otro lado, los otros IE presentan traslapes importantes entre la condición sana y dañada, así como valores-p mayores respecto a los correspondientes de los IE seleccionados, lo que limita su uso para determinar correctamente la condición del puente. La tabla 4.2 resume los valores-p estimados por los diecisiete IE para distinguir entre dos condiciones de puente.

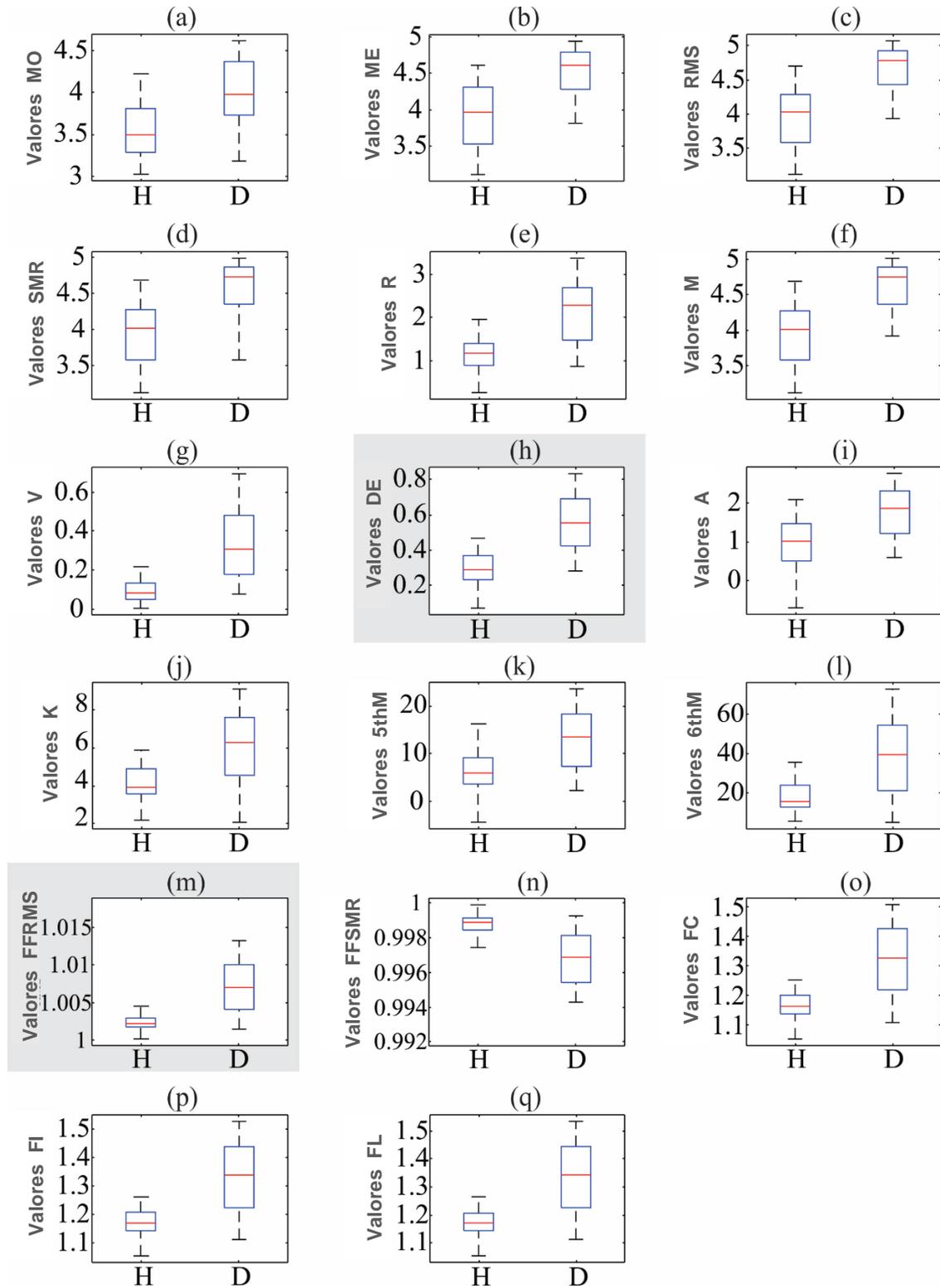


Figura 4.9. Distribución de datos estimada por el MKW para las condiciones sanas y dañadas y los diversas IE: (a) MO, (b) ME, (c) RMS, (d) SMR, (e) R, (f) M, (g) V, (h) DE, (i) A, (j) K, (k) 5thM, (l) 6thM, (m) FFRMS, (n) FFSMR, (o) FC, (p) FI, y (q) FL.

Tabla 4.2. Valores-p calculados por el MKW para los 17 IE evaluados para discriminar entre puente sano y dañado.

Número de IE	IE	Valor-p
1	Modo (MO)	$5.1 \times 10^{-5}$
2	Mediana (ME)	$7.4 \times 10^{-6}$
3	Root mean square (RMS)	$6.8 \times 10^{-6}$
4	Square mean root (SMR)	$1.3 \times 10^{-5}$
5	Rango (R)	$4.4 \times 10^{-6}$
6	Media (M)	$5.2 \times 10^{-6}$
7	Varianza (V)	$4.3 \times 10^{-6}$
<b>8</b>	<b>Desviación estándar (DE)</b>	<b><math>3.3 \times 10^{-7}</math></b>
9	Asimetría (A)	$6.1 \times 10^{-5}$
10	Kurtosis (K)	$5.0 \times 10^{-4}$
11	Quinto momento (5thM)	$7.0 \times 10^{-5}$
12	Sexto momento (6thM)	$3.0 \times 10^{-4}$
<b>13</b>	<b>Factor de forma RMS (FFRMS)</b>	<b><math>4.2 \times 10^{-6}</math></b>
14	Factor de forma SMR (FFSMR)	$2.2 \times 10^{-5}$
15	Factor de cresta (FC)	$6.8 \times 10^{-6}$
16	Factor de impulso (FI)	$6.5 \times 10^{-6}$
17	Factor de latitud (FL)	$6.9 \times 10^{-6}$

Para determinar la condición del puente de manera automática, los IE seleccionados (valores DE y FFRMS), las características más discriminatorias, se emplean para diseñar un CLD con el objetivo de evaluar el estado de salud del puente atirantado. Como se mencionó en la sección 4.2.2.3, el CLD se construye a partir de un conocimiento previo de los datos; en esta investigación, las funciones de densidad de probabilidad para los índices DE y FFRMS se utilizan como fuentes de información acerca de sus comportamientos (ver figura 4.10a). A partir de estas funciones, se construyen las funciones de pertenencia (funciones de combinación gaussiana) para las entradas DE y FFRMS como se muestra en la figura 4.10b. Estas funciones están etiquetadas como LV (*low value*, valor bajo) y HV (*high value*, valor alto). La figura 4.10b también muestra la función de pertenencia para la salida, donde la salida nítida mediante el uso de un sistema Mamdani puede tomar valores de 0.5 a 2.5 con  $HLT = 1$  para puente sano y  $DMG = 2$  para puente dañado. En la tabla 4.3, se muestran las cuatro reglas utilizadas, donde una regla se puede leer de la siguiente manera (resaltada en gris claro): si DE es LV y FFRMS es LV, entonces la condición del puente es HLT. Finalmente, en el mecanismo de inferencia, el CLD lleva a cabo una composición mínima para cuantificar la salida de la función de pertenencia y el método del centro de gravedad para la defuzzificación [60]. En la tabla 4.4 se muestran los resultados de la clasificación como una matriz de confusión, donde se obtiene una efectividad del 93.33% ya que

de las 30 pruebas de condición sana 2 se clasificaron como condición de daño. Una vez detectada la condición de daño, se procede con la etapa de localización del daño (ver figura 4.3), logrando una precisión del 100%, es decir, el daño se localizó correctamente en las 28 pruebas que se clasificaron como condición de daño de manera acertada. La figura 4.11 muestra algunos resultados de esta etapa, donde se puede observar que el valor IES máximo, que corresponde al sensor 5 asociado a la zona dañada con el tirante no. 6, está dentro de la zona  $3\sigma$ . Cabe señalar que el método propuesto ubica el daño dentro de zonas delimitadas por el número de sensores; por lo tanto, cuanto mayor sea el número de sensores, más precisa será la localización.

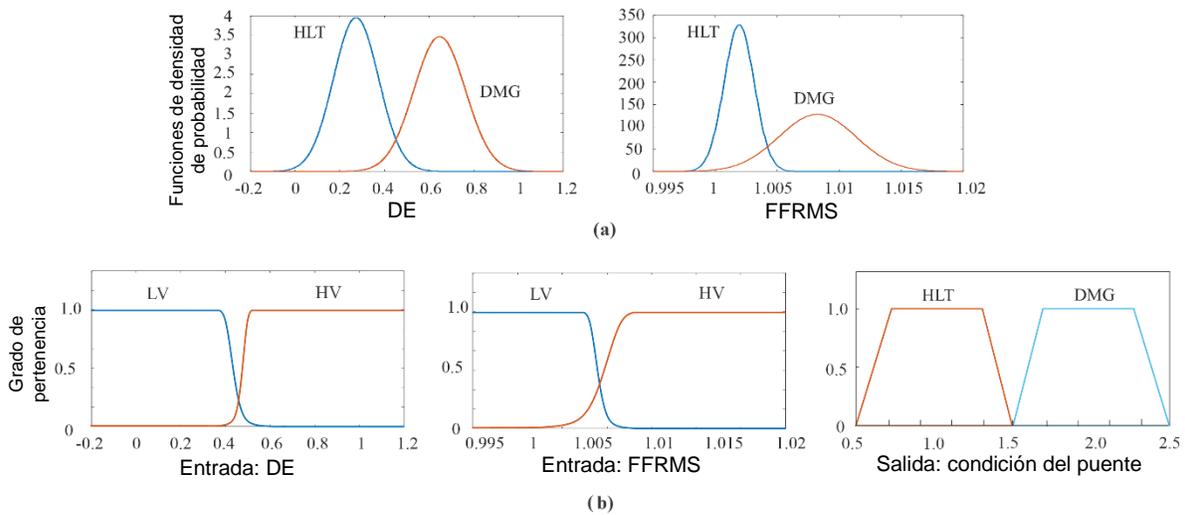


Figura 4.10. Sistema CLD propuesto: (a) funciones gaussianas para la DE y el FFRMS y (b) funciones de pertenencia.

Tabla 4.3. Reglas para el CLD propuesto.

Entradas	FFRMS	
DE	LV	HV
LV	HLT	DMG
HV	HLT	DMG

Tabla 4.4. Resultados del CLD (matriz de confusión).

	HLT	DMG	Efectividad
HLT	28	2	93.33%
DMG	2	28	93.33%

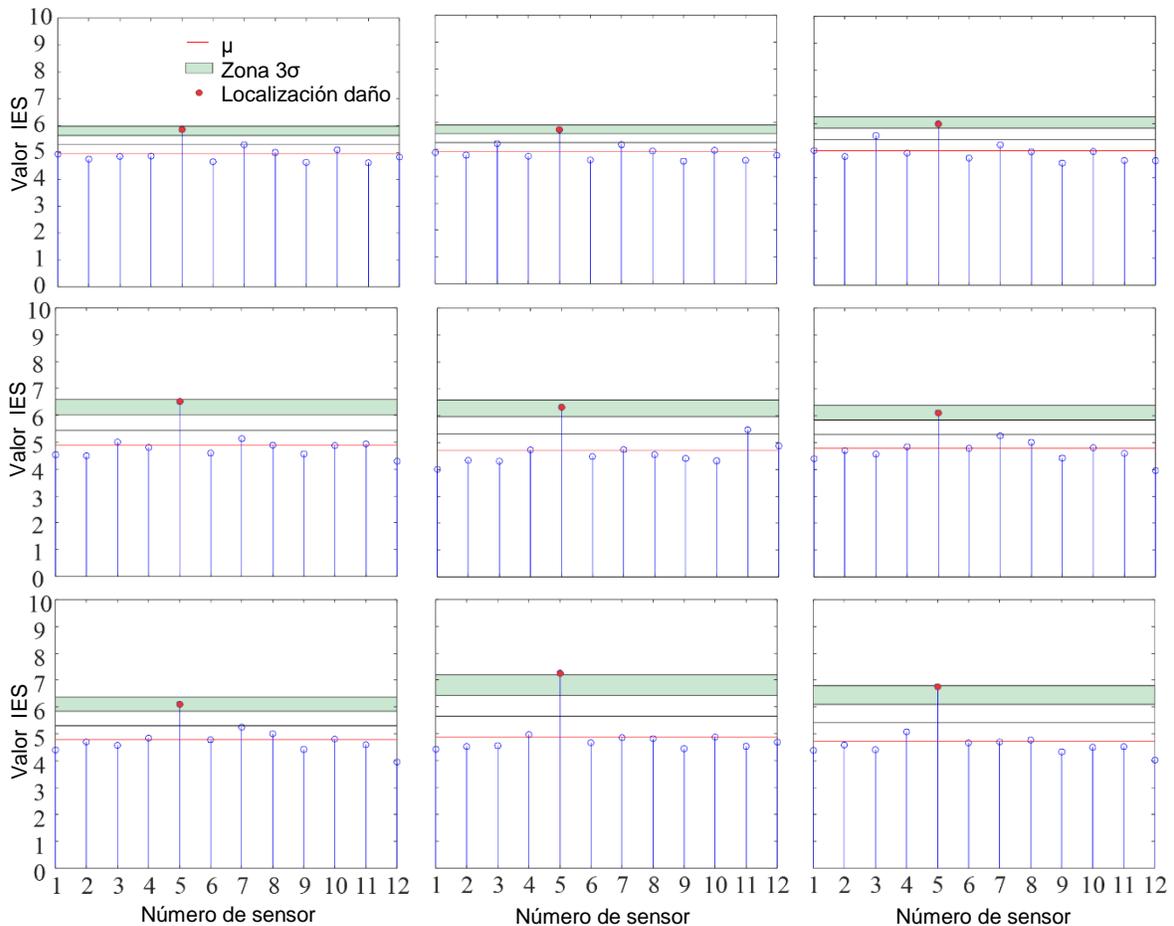


Figura 4.11. Resultados para la localización de daño.

## 4.5 Conclusiones parciales

En este capítulo 4 se presentó una nueva metodología basada en la entropía de Shannon para detectar y localizar un tirante suelto en un puente atirantado expuesto a vibraciones ambientales. Con este método, se analizan las respuestas vibratorias del puente atirantado por medio del IES e IE para identificar características o patrones capaces de evaluar la condición del puente. El MKW se emplea para definir los IE más útiles para relacionar los valores IES estimados para todos los sensores con la condición del puente. Los IE seleccionados se usan para configurar un CLD para determinar el estado del puente automáticamente. Finalmente, se emplea el criterio DNE para localizar la zona dañada. La efectividad de la metodología propuesta se determina mediante los datos de vibración adquiridos experimentalmente en el Puente Río Papaloapan. Los resultados validan que los IES integrados con los IE son índices confiables para detectar y localizar tirantes sueltos en un puente atirantado, ya que se obtiene una precisión del 93.33% para la detección de daño. Una vez detectado el daño, se obtiene 100% de efectividad para su localización.

La propuesta exhibió una buena capacidad para detectar y localizar la pérdida de un tirante en un puente atirantado real, lo cual es una característica deseable en esquemas SHM porque permite reducir el tiempo de inspección principalmente en estructuras grandes como la que se analizó. Además, el método propuesto presenta una solución de baja complejidad computacional, lo que permitirá su implementación en un procesador de gama baja con el fin de evaluar la condición del puente de forma continua. Como trabajo futuro, la metodología propuesta se evaluará bajo otros tipos de daño y otros tipos de estructuras civiles, además de analizar el efecto de los factores ambientales, con el objetivo de calibrar su desempeño bajo estas nuevas condiciones y generar un esquema SMH más completo.

## 5. Comparación de métodos de detección de daño en puentes atirantados

---

En este capítulo se presenta la comparación entre los diversos métodos de detección de daño en puentes atirantados que se han desarrollado y aplicado en los últimos tres años por investigadores del Grupo de Monitoreo Estructural (GME) del IMT conjuntamente con investigadores del *Engineering Applications Research Group* (ENAP-RG) de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) campus San Juan del Río y que se mostraron en los capítulos 2, 3 y 4 de esta publicación (ver Tabla 5.1); así como también se muestra la comparación de los métodos más promisorios que se han desarrollado en el GME – ENAP-RG para detectar tirantes dañados en puentes atirantados (MAEW y MIES) contra diversos métodos de vanguardia desarrollados y publicados por diferentes investigadores del mundo (ver Tabla 5.2). Esta última tabla comparativa permite situar los métodos desarrollados en el GME – ENAP-RG en el contexto actual de las investigaciones mundiales que se están desarrollando y valorar sus capacidades.

En la Tabla 5.1 se puede observar que el método basado en cambios de parámetros modales no presenta ninguna ventaja, mientras que los métodos basados en cambios de valores RMS y Kurtosis tienen ventajas muy limitadas y desventajas contundentes para no ser confiables; por lo que esos tres métodos se descartan de la intención de seguir trabajando en ellos, debido a que no presentan garantías para detectar daño en puentes reales. Por otra parte, el MAEW y el MIES son métodos muy promisorios y se seguirá trabajando en ellos con el objetivo de mejorar sus desempeños y eficiencias, ya que tienen potencial para ser implementados en puentes reales y ayudar a la detección oportuna de daño.

Así entonces, los métodos MAEW y el MIES presentan resultados muy alentadores para detectar daño en puentes atirantados y se vislumbra que pueden ser aplicados en los puentes atirantados más críticos del país, ya que ambos detectan y localizan daño con gran precisión, son métodos de bajo costo y han sido probados para detectar daño en tirantes, que es el tipo de daño más peligroso en esta clase de puentes y que ha provocado la falla de dos tirantes del PRP. Se contempla también que ambos métodos se podrían implementar simultáneamente como métodos de respaldo o redundantes para incrementar la confiabilidad en la detección de daño y reducir el número de falsas alarmas.

**Tabla 5.1. Comparación de métodos de detección de daño en puentes atirantados desarrollados recientemente en el GME – ENAP-RG.**

Método	Tipo de análisis	Tipo de puente	Tipo de daño	Ventajas	Desventajas
Cambios de parámetros modales	Numérico y experimental en puente real	Puente atirantado (PRP)	Daño en tablero y tirantes	–	* No presenta ningún indicio alentador para detectar daño ni de forma numérica ni experimental.
Cambios de valores RMS	Numérico y experimental en puente real	Puente atirantado (PRP)	Daño en tablero y tirantes	Sólo presenta ventajas usando datos numéricos con daño en tablero: * Detecta daño. * Cuantifica daño. * Pocos sensores. * Método sencillo.	* No presenta indicios alentadores para detectar daño en puente real. * Requiere datos de prueba controlada. * Localiza sólo daño severo.
Cambios de valores kurtosis	Numérico y experimental en puente real	Puente atirantado (PRP)	Daño en tablero y tirantes	Sólo presenta ventajas usando datos numéricos con daño en tablero: * Cuantifica daño. * Pocos sensores. * Método sencillo.	* No presenta indicios alentadores para detectar daño en puente real. * Requiere datos de prueba controlada. * Detecta sólo daño severo. * No localiza daño.
MAEW	Numérico y experimental en puente real	Puente atirantado (PRP)	Daño en tablero y tirantes	* Detecta daño (diferentes tipos). * Localiza daño (gran precisión). * Cuantifica daño. * Pocos sensores.	* No es un método sencillo. * Requiere datos de prueba controlada.
MIES	Experimental en puente real	Puente atirantado (PRP)	Daño en tirante	* Detecta daño. * Localiza daño (gran precisión). * Probado con éxito en un puente real. * Método sencillo. * No requiere datos de prueba controlada.	* Falta probar otros tipos de daño. * Falta análisis de severidad para cuantificar daño. * Precisión en localización depende del número de sensores.

Por otra parte, en la Tabla 5.2 se presenta una comparación de métodos enfocados en la detección de tirantes dañados en puentes atirantados, incluidos los desarrollados en el GME – ENAP-RG (MAEW y MIES) y otros métodos recientemente presentados en la literatura mundial, en donde se pueden apreciar las metodologías empleadas, los alcances y precisión. Observando dicha tabla, la mayoría de los trabajos reportados en la literatura se han enfocado en proponer métodos para la detección y localización de daño en tirantes basados en simulaciones numéricas y experimentos de laboratorio donde emplean sólo algunos elementos del puente, obteniendo una precisión superior al 60% [62–67]. A pesar de los resultados prometedores, los autores mencionan que se requiere una investigación más profunda de sus métodos propuestos bajo condiciones reales, teniendo en cuenta el tráfico y el viento. Por otro lado, los trabajos presentados en [68, 69] han evaluado la eficiencia de sus métodos en puentes atirantados reales. En [68] se emplea el Método de Coeficientes de Transferencia para detectar tirantes

sueltos en el puente atirantado Ai-Lan con una precisión del 95%. Los autores mencionan que su precisión para determinar el estado de salud del puente depende de la ventana de tiempo evaluada (por ejemplo, 9 horas), lo cual puede ser una limitación para evaluar la condición del puente en tiempo real. Por otro lado, en [69] se investigó el Método de Búsqueda Global para detectar y localizar la pérdida de un tirante en el PRP, donde se alcanza una precisión del 90%. Los autores mencionan que su trabajo requiere de un modelo MEF combinado con mediciones reales en el puente para determinar su condición de manera eficiente.

Los métodos anteriormente mencionados contribuyeron con avances significativos en el diagnóstico estructural de los puentes atirantados en los últimos años. No obstante, los métodos propuestos en esta publicación (MAEW y MIES) superan a los métodos antes mencionados, ya que incluyen análisis en un puente real, se implementan a bajo costo, no requieren un modelo numérico, son capaces de detectar y localizar eficientemente la pérdida de tirante con gran precisión y no requieren interpretación única por parte de un experto ni mediciones largas en diferentes estaciones del año; lo que resulta atractivo para aplicaciones industriales.

**Tabla 5.2. Comparación de métodos de detección de daño en tirantes de puentes atirantados.**

Trabajo	Metodología	Alcance	Precisión (%)
Ni et al. [62]	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Matrices de flexibilidad modal construidas usando algunos modos truncados y vectores modales incompletos de un modelo MEF de puente.</li> <li>* Cambio de flexibilidad relativa (RFC) entre estados sanos y dañados como índice para detectar y localizar daño.</li> <li>* Detección de daño eliminando la influencia de dos factores ambientales (cambio de temperatura y carga de tráfico).</li> </ul>	Detección Localización	No reportada
Santos et al. [63]	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Estrategias de fusión para convertir grandes cantidades de datos en pequeños fragmentos.</li> <li>* Algoritmos de reconocimiento de patrones para analizar la información.</li> <li>* <i>Principal Component Analysis</i> (PCA), regla <i>broke-stick</i>, métodos de agrupamiento, objetos de datos simbólicos y distancias simbólicas combinadas para eliminar los efectos de acciones regulares impuestas a las estructuras y para comprimir conjuntos de datos SHM en un índice de daño sensible.</li> </ul>	Detección	99
Ho et al. [64]	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Imágenes capturadas por 3 cámaras a lo largo del tirante se transmiten a una computadora.</li> <li>* Daño en la superficie detectado usando técnicas de procesamiento de imágenes y reconocimiento de patrones.</li> <li>* Filtro mediano, ecualización de histograma y PCA para procesar imágenes.</li> <li>* Distancia Mahalanobis para clasificación de patrones.</li> </ul>	Detección Localización	60 - 93.3
Scarella et al. [65]	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Sensor de fibra óptica BOTDA (<i>Brillouin scattering optical time domain analysis</i>) para monitorear la deformación distribuida en el tablero de un puente de laboratorio.</li> <li>* Formulaciones desarrolladas para establecer una relación entre la redistribución de las deformaciones del tablero y la pérdida de tensión en los tirantes individuales de un puente.</li> </ul>	Detección Localización	98.2
An et al. [66]	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Cambio de frecuencia debido a un tirante dañado usado como índice de daño.</li> </ul>	Detección Localización	No reportada

	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Barra de acero diagonal instalada temporalmente con un extremo en el tirante cerca del anclaje inferior y el otro extremo en el tablero del puente.</li> <li>* La frecuencia de la parte corta aumenta y se amplifica el cambio de frecuencia local de la parte corta debido a daño en todo el tirante.</li> </ul>		
Meng et al. [67]	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Puente excitado con los tirantes activos y respuestas medidas en el tablero.</li> <li>* Datos descompuestos en n-modos empíricos (IMFs).</li> <li>* Selección de los IMFs que contienen información de los modos dominantes.</li> <li>* Espectro marginal de Hilbert de cada medición usando los IMFs relacionados.</li> <li>* Índices de daño usando las ecuaciones respectivas para cada escenario.</li> </ul>	Detección Localización	97
Chen et al. [68]	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Coeficientes de transferencia para variaciones de temperatura diaria y temperatura a largo plazo.</li> <li>* Efectos de la temperatura ambiental excluidos del historial de variación de la fuerza del tirante utilizando los coeficientes de transferencia.</li> <li>* Análisis estadístico para definir umbrales y establecer criterios adecuados para la detección de daño.</li> </ul>	Detección	95
Quintana et al. [69]	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Modelo MEF calibrado.</li> <li>* Fuerza conocida para excitación estructural.</li> <li>* Adquisición de alta frecuencia (al menos diez veces la frecuencia de Nyquist).</li> <li>* Adquisición de respuesta dinámica experimental.</li> <li>* Reconstrucción de la respuesta dinámica a través de la fuerza conocida.</li> <li>* Algoritmo para minimizar una función entre las señales dinámicas experimentales y del modelo MEF mediante cambios de parámetros estructurales en el modelo MEF.</li> </ul>	Detección Localización	90
MAEW	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Se miden las señales de vibración a lo largo del tablero mientras un vehículo con velocidad baja y constante cruza el puente.</li> <li>* Se aplica filtro Savitzky-Golay en las señales.</li> <li>* Se restan las señales medidas y las del puente sano (<i>baseline</i>).</li> <li>* Se selecciona la <i>mother wavelet</i> adecuada y se obtienen diagramas CWT para señales sanas y restadas.</li> <li>* Se eliminan los efectos de borde y se ajusta el rango de escala en los diagramas CWT.</li> <li>* Se obtiene la EW promedio.</li> <li>* La EW de un puente sano es baja y plana, mientras que para un puente dañado hay acumulación de EW en la ubicación del daño.</li> </ul>	Detección Localización	95.5 - 97.8
MIES	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Respuestas de vibración mediadas en el puente expuesto a tráfico.</li> <li>* Análisis de señales con IES para obtención de patrones característicos.</li> <li>* MKW para reducción de patrones característicos.</li> <li>* CLD para detección daño.</li> <li>* DNE para localización de daño.</li> </ul>	Detección Localización	93.3

## Conclusiones generales

---

En esta publicación se presentaron diversos métodos de identificación de daño en puentes atirantados que se han desarrollado y/o estudiado en los últimos tres años por investigadores del GME-IMT y ENAP-RG-UAQ: método basado en cambios de parámetros modales, métodos basados en cambios de valores RMS/kurtosis, método de acumulación de energía *wavelet* (MAEW) y método basado en el índice de entropía de Shannon (MIES). Estos métodos se aplicaron en un modelo numérico MEF del PRP y/o directamente usando los datos del monitoreo del PRP a fin de evaluar sus capacidades de detección, localización y cuantificación de diferentes tipos de daño y, además, compararlos entre sí, con el objetivo de determinar cuáles son los más promisorios que tienen el potencial de identificar daño en puentes reales para evitar accidentes.

Los métodos basados en cambios de parámetros modales y valores RMS/kurtosis mostraron ventajas muy limitadas con el uso de datos numéricos y no presentaron resultados esperanzadores para identificar daño en puentes reales. Por otra parte, el MAEW y el MIES mostraron resultados muy alentadores, ya que fueron capaces de detectar y localizar daño con gran precisión usando datos del monitoreo de un puente atirantado real (PRP). Por tanto, estos dos últimos métodos se compararon a su vez contra otros métodos desarrollados recientemente por investigadores de diversos países y, se pudo observar que, ambos métodos (MAEW y MIES) reúnen características que superan en ventajas a los otros métodos; por lo que en el escenario mundial de las investigaciones actuales quedan muy bien situados. Así entonces, se contempla seguir trabajando en los métodos MAEW y MIES para ser aplicados de forma automática en los puentes atirantados más críticos del país, ya que además son de bajo costo y los beneficios en cuanto a incrementar la confiabilidad en el uso de estos puentes justificarían la inversión.



## Bibliografía

---

- [1] C. LeRose, The collapse of the Silver Bridge, *West Virginia Historical Society Quarterly*, 15(4), 1, 2001.
- [2] A. Penn, The deadliest bridge collapses in the US in the last 50 years, CNN, EUA, Marzo 15, 2018.
- [3] M. Davey, M.L. Wald, Potential flaw is found in design of fallen bridge, *The New York Times*, Agosto 8, 2007.
- [4] C.R. Farrar, K. Worden, An introduction to structural health monitoring, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365, 303–315, 2007.
- [5] C.R. Farrar, N.A. Lieven, Damage prognosis: the future of structural health monitoring, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science*, 365, 623–632, 2007.
- [6] X. Kong, C.-S. Cai, J. Hu, The state-of-the-art on framework of vibration-based structural damage identification for decision making, *Applied Sciences*, 7(497), 1–31, 2017.
- [7] J.R. Casas, A.C. Aparicio, Structural damage identification from dynamic-test data, *Journal of Structural Engineering*, 120, 2437–2450, 1994.
- [8] J.P. Conte, X. He, B. Moaveni, S.F. Masri, J.P. Caffrey, M. Wahbeh, F. Tasbihgoo, D.H. Whang, A. Elgamal, Dynamic testing of Alfred Zampa memorial bridge, *Journal of Structural Engineering*, 134, 1006–1015, 2008.
- [9] X. He, B. Moaveni, J.P. Conte, A. Elgamal, S.F. Masri, System identification of Alfred Zampa Memorial Bridge using dynamic field test data, *Journal of Structural Engineering*, 135, 54–66, 2009.
- [10] H. Guan, V.M. Karbhari, Improved damage detection method based on element modal strain damage index using sparse measurement, *Journal of Sound and Vibration*, 309, 465–494, 2008.
- [11] M. Salehi, S. Ziaei-Rad, M. Ghayour, A structural damage detection technique based on modal strain energy, *The 17th Annual International Conference on Mechanical Engineering (ISME2009)*, Terán, Irán, 2009.

- [12]Z. Zhang, A.E. Aktan, The damage indices for the constructed facilities, The International Society for Optical Engineering, San Diego, California, EUA, 1995.
- [13]R.J. Allemang, D.L. Brown, A correlation coefficient for modal vector analysis, The 1st International Modal Analysis Conference, Orlando, Florida, EUA, 1982.
- [14]O.S. Salawu, C. Williams, Bridge assessment using forced-vibration testing, *Journal of Structural Engineering*, 121, 161–173, 1995.
- [15]A.K. Pandey, M. Biswas, M.M. Samman, Damage detection from changes in curvature mode shapes, *Journal of Sound and Vibration*, 145, 321–332, 1991.
- [16]Y. Zhang, S.T. Lie, Z. Xiang, Damage detection method based on operating deflection shape curvature extracted from dynamic response of a passing vehicle, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 35, 238–254, 2013.
- [17]R.P.C. Sampaio, N.M.M. Maia, J.M.M. Silva, Damage detection using the frequency-response-function curvature method, *Journal of Sound and Vibration*, 226, 1029–1042, 1999.
- [18]S. Rahmatalla, E.T. Lee, H.C. Eun, Damage detection by the distribution of predicted constraint forces, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26, 1079–1087, 2012.
- [19]D.M. Reddy, S. Swarnamani, Application of the FRF curvature energy damage detection method to plate like structures, *World Journal of Modelling and Simulation*, 8(2), 147–153, 2012.
- [20]N.M.M. Maia, R.A.B. Almeida, A.P.V. Urgueira, R.P.C. Sampaio, Damage detection and quantification using transmissibility, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25, 2475–2483, 2011.
- [21]S. Chesné, A. Deraemaeker, Damage localization using transmissibility functions: A critical review, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 38, 569–584, 2013.
- [22]G. Canales, L. Mevel, M. Basseville, Transmissibility based damage detection, The Society for Experimental Mechanics, Orlando, Florida, EUA, 2009.
- [23]R. Brincker, L. Zhang, P. Andersen, Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition, *Smart Materials and Structures*, 10, 441–445, 2001.
- [24]S.R. Ibrahim, E. Mikulcik, A method for the direct identification of vibration parameters from the free response, *Computer Science*, 1, 1–6, 1977.

- 
- [25] J.K. Vandiver, A.B. Dunwoody, R.B. Campbell, M.F. Cook, A mathematical basis for the random decrement vibration signature analysis technique, *Journal of Mechanical Design*, 104, 307–313, 1982.
- [26] P. Omenzetter, J.M.W. Brownjohn, Application of time series analysis for bridge monitoring, *Smart Materials and Structures*, 15, 129–138, 2006.
- [27] F.P. Kopsaftopoulos, S.D. Fassois, Vibration based health monitoring for a lightweight truss structure: experimental assessment of several statistical time series methods, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24, 1977–1997, 2010.
- [28] Q. Mei, M. Gül, A fixed-order time series model for damage detection and localization, *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 6, 763–777, 2016.
- [29] Y.L. Xu, J. Chen, Structural damage detection using empirical mode decomposition: experimental investigation, *Journal of Engineering Mechanics*, 130, 1279–1288, 2004.
- [30] J. Chen, Application of empirical mode decomposition in structural health monitoring: some experience, *Advances in Data Science and Adaptive Analysis*, 1, 601–621, 2009.
- [31] J.M. Machorro-López, F.J. Carrión-Viramontes, J.A. Quintana-Rodríguez, J.I. Valenzuela-Delgado, M. Anaya-Díaz, L.A. Martínez-Trujano, H.M. Gasca-Zamora, J.A. Hernández-Figueroa, A. Hernández-Guzmán, M. Martínez-Madrid, Desarrollo del método de acumulación de energía wavelet para la identificación de daño y su aplicación en el Puente Río Papaloapan, *Publicación Técnica IMT No. 579*, 1-79, Querétaro, México, 2020.
- [32] M.A. Astiz, Composite construction in cable-stayed bridge towers, *The International Conference on Composite Construction-Conventional and Innovative*, Innsbruck, Austria, 1997.
- [33] ASTM Standard A148/A 148M-15a. Standard specification for steel castings, high strength, for structural purposes, ASTM International, West Conshohocken, Pensilvania, EUA, 2015.
- [34] A. Aguirre, J. Carbajal, Análisis en el tirante 11 del Puente Papaloapan, *Corporación Mexicana de Investigación de Materiales S.A. de C.V.*, Reporte interno AF-IFT/00087, Saltillo, Coahuila, México, 2000.
- [35] A. López, C. Poblano, Análisis de falla y pruebas de fatiga del anclaje desprendido del tirante 11, lado agua, torre 3, del Puente Río Papaloapan, *Instituto Mexicano del Transporte*, Reporte interno EQ001/00, Sanfandila, Querétaro, México, 2000.

- [36] J. Terán, M. Arroyo, M. Lomelí, M. Martínez, Análisis de falla del elemento de sujeción del tirante 1, semi-arpa 5, Instituto Mexicano del Transporte, Informe de servicio E-010/2015, Sanfandila, Querétaro, México, 2015.
- [37] A. Monaco, N. Amoroso, L. Bellantuono, E. Lella, A. Lombardi, A. Monda, A. Tateo, R. Bellotti, S. Tangaro, Shannon entropy approach reveals relevant genes in Alzheimer's disease, *PLoS ONE*, 14(12), 1–29, 2019.
- [38] M. Alafeef, M. Fraiwan, H. Alkhalaf, Z. Audat, Shannon entropy and fuzzy C-means weighting for AI-based diagnosis of vertebral column diseases, *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 11, 2557–2566, 2020.
- [39] Z. Sun, P. Liu, Z. Wang, Real-time fault diagnosis method of battery system based on Shannon entropy, *Energy Procedia*, 105, 2354–2359, 2017.
- [40] G. Alvarez-Monroy, A. Mejia-Barron, M. Valtierra-Rodriguez, D. Granados-Lieberman, J. Olivares-Galvan, R. Escalera-Perez, A new EMD-Shannon entropy-based methodology for detection of inter-turn faults in transformers, *The IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing*, Ixtapa, Guerrero, México, 2017.
- [41] A. Moreno-Gomez, J.P. Amezcua-Sanchez, M. Valtierra-Rodriguez, C.A. Perez-Ramirez, A. Dominguez-Gonzalez, O. Chavez-Alegria, EMD-Shannon entropy-based methodology to detect incipient damages in a truss structure, *Applied Sciences*, 8(2068), 1–16, 2018.
- [42] J.P. Amezcua-Sanchez, Entropy algorithms for detecting incipient damage in high-rise buildings subjected to dynamic vibrations, *Journal of Vibration and Control* 1, 1–11, 2020.
- [43] C.E. Shannon, A mathematical theory of communication, *Bell System Technical Journal*, 27, 379–423, 1948.
- [44] K.X. Zhong, H.L. Guo, H.Z. Zi, Damage detection of concrete structure based on approximate entropy, *Applied Mechanics and Materials*, 226(228), 920–925, 2012.
- [45] A.M.B. Martins, L.M.C. Simões, J.HJ. Negrão, Optimization of concrete cable-stayed bridges under seismic action, *Computers and Structures*, 222, 36–47, 2019.
- [46] Y.H. An, J.P. Ou, Structural damage localization for a frame structure from changes in curvature of approximate entropy feature vectors, *Nondestructive Testing and Evaluation*, 29, 80–97, 2014.
- [47] X. Guan, Y. Wang, J. He, A probabilistic damage identification method for shear structure components based on cross-entropy optimizations, *Entropy*, 19(27), 1–17, 2017.

- 
- [48] T.K. Lin, A.G. Laínez, Entropy-based structural health monitoring system for damage detection in multi-bay three-dimensional structures, *Entropy* 20(1), 1–26, 2018.
- [49] C.A. Perez-Ramirez, J.P. Amezcua-Sanchez, M. Valtierra-Rodriguez, H. Adeli, A. Dominguez-Gonzalez, R.J. Romero-Troncoso, Recurrent neural network model with Bayesian training and mutual information for response prediction of large buildings, *Engineering Structures*, 178, 603–615, 2019.
- [50] M. Mousavi, D. Holloway, J.C. Olivier, A.H. Alavi, A.H. Gandomi, A Shannon entropy approach for structural damage identification based on self-powered sensor data, *Engineering Structures*, 200, 1–11, 2019.
- [51] G. Ruocci, G. Cumunel, T. Le, P. Argoul, N. Point, L. Dieng, Damage assessment of pre-stressed structures: A SVD-based approach to deal with time-varying loading, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 47(1-2), 50–65, 2014.
- [52] W. Caesarendra, T. Tjahjowidodo, A review of feature extraction methods in vibration-based condition monitoring and its application for degradation trend estimation of low-speed slew bearing, *Machines*, 5(4), 1–28, 2017.
- [53] R. de Almeida-Cardoso, A. Cury, F. Barbosa, Automated real-time damage detection strategy using raw dynamic measurements, *Engineering Structures*, 196, 1–16, 2019.
- [54] J.J. Saucedo-Dorantes, M. Delgado-Prieto, R.J. Romero-Troncoso, R.A. Osornio-Rios, Multiple-fault detection and identification scheme based on hierarchical self-organizing maps applied to an electric machine, *Applied Soft Computing*, 81, 1–12, 2019.
- [55] W.H. Kruskal, W.A. Wallis, Use of ranks in one-criterion variance analysis, *Journal of the American Statistical Association*, 47(260), 583–621, 1952.
- [56] S.K. Bashar, M.I.H. Bhuiyan, Classification of motor imagery movements using multivariate empirical mode decomposition and short time Fourier transform based hybrid method, *Engineering Science and Technology*, 19(3), 1457–1464, 2016.
- [57] M.H. Kutner, C.J. Nachtsheim, J. Neter, W. Li, *Applied linear statistical models*, McGraw-Hill Irwin, Nueva York, EUA, 2005.
- [58] W. Fan, P.Z. Qiao, Vibration-based damage identification methods: a review and comparative study, *Structural Health Monitoring*, 10(1), 83–111, 2011.
- [59] D. Granados-Lieberman, J.R. Razo-Hernandez, V. Venegas-Rebollar, J.C. Olivares-Galvan, M. Valtierra-Rodriguez, Harmonic PMU and fuzzy logic for online detection of short-circuited turns in transformers, *Electric Power Systems Research*, 190, 1–11, 2021.

- [60] K.M. Passino, S. Yurkovich, Fuzzy Control, Addison-Wesley, California, EUA, 1998.
- [61] E. Cabal-Yepez, R.J. Romero-Troncoso, A. Garcia-Perez, C. Rodriguez-Donate, Novel hardware processing unit for dynamic on-line entropy estimation of discrete time information, *Digital Signal Processing*, 20(2), 337–346, 2010.
- [62] Y.Q. Ni, H.F. Zhou, K.C. Chan, J.M. Ko, Modal flexibility analysis of cable-stayed Ting Kau bridge for damage identification, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 23, 223–236, 2008.
- [63] J.P. Santos, C. Cremona, A.D. Orcesi, P. Silveira, Early damage detection based on pattern recognition and data fusion, *Journal of Structural Engineering*, 143(2), 1–11, 2016.
- [64] H.N. Ho, K.D. Kim, Y.S. Park, J.J. Lee, An efficient image-based damage detection for cable surface in cable-stayed bridges, *Nondestructive Testing and Evaluation*, 58, 18–23, 2013.
- [65] A. Scarella, G. Salamone, S.K. Babanajad, A. De Stefano, F. Ansari, Dynamic Brillouin scattering–based condition assessment of cables in cable-stayed bridges, *Journal of Bridge Engineering*, 22(3), 1–12, 2017.
- [66] Y. An, Y. Zhong, Y. Tan, J. Ou, Experimental and numerical studies on a test method for damage diagnosis of stay cables, *Advances in Structural Engineering*, 20(2), 1–12, 2016.
- [67] F. Meng, B. Mokrani, D. Alaluf, J. Yu, A. Preumont, Damage detection in active suspension bridges: an experimental investigation, *Sensors*, 18(3002), 1–20, 2018.
- [68] C.C. Chen, W.H. Wu, C.Y. Liu, G. Lai, Damage detection of a cable-stayed bridge based on the variation of stay cable forces eliminating environmental temperature effects, *Smart Structures and Systems*, 17(6), 859–880, 2016.
- [69] J.A. Quintana-Rodriguez, F.J. Carrion-Viramontes, S. Crespo-Sanchez, Damage detection on a cable stayed bridge using wave propagation analysis, *The 7th European Workshop on Structural Health Monitoring*, Nantes, Francia, 2014.



**COMUNICACIONES**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



**Km 12+000 Carretera Estatal 431 “El Colorado Galindo”**  
Parque Tecnológico San Fandila, Mpio. Pedro Escobedo,  
Querétaro, México. C.P. 76703  
Tel: +52 (442) 216 97 77 ext. 2610  
Fax: +52 (442) 216 9671

[publicaciones@imt.mx](mailto:publicaciones@imt.mx)

<http://www.imt.mx/>