



Desarrollo del método de acumulación de energía *wavelet* para la identificación de daño y su aplicación en el puente Río Papaloapan

**José Manuel Machorro López
Francisco Javier Carrión Viramontes
Juan Antonio Quintana Rodríguez
Jesús Iván Valenzuela Delgado
Miguel Anaya Díaz
Luis Álvaro Martínez Trujano
Héctor Miguel Gasca Zamora
Jorge Alberto Hernández Figueroa
Andrés Hernández Guzmán
Miguel Martínez Madrid**

**Publicación Técnica No. 579
Sanfandila, Qro, 2020**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Desarrollo del método de acumulación de energía
wavelet para la identificación de daño y su
aplicación en el puente Río Papaloapan**

Publicación Técnica No. 579
Sanfandila, Qro, 2020

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte, por el Dr. José Manuel Machorro López, el Dr. Francisco Javier Carrión Viramontes, el Dr. Juan Antonio Quintana Rodríguez, el M. C. Jesús Iván Valenzuela Delgado, el M. C. Miguel Anaya Díaz, el M. I. Luis Álvaro Martínez Trujano, el Ing. Héctor Miguel Gasca Zamora, el Ing. Jorge Alberto Hernández Figueroa, el Ing. Andrés Hernández Guzmán y el Dr. Miguel Martínez Madrid.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna EI 20/19 *Detección de daño en un puente mediante la acumulación de energía wavelet (AEW)*.

Se agradece la colaboración del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por todo el apoyo para hacer posible esta investigación a través del Programa "Cátedras Conacyt".

Contenido

	Página
Índice de figuras.....	v
Índice de tablas.....	xi
Sinopsis.....	xiii
Abstract.....	xv
Resumen ejecutivo.....	xvii
Introducción.....	1
1 Descripción del puente Río Papaloapan, fallas principales y su sistema SHM.....	7
2 <i>Continuous Wavelet Transform</i> (CWT).....	11
3 Descripción del modelo numérico.....	17
4 Resultados de las simulaciones numéricas y descripción del MAEW.....	21
5 Resultados del caso de falla real.....	47
Conclusiones.....	51
Bibliografía.....	53

Índice de figuras

		Página
Figura 0.1	Puente 9340 visto desde arriba después del colapso en Minesota, EUA, el 1 de agosto de 2007	3
Figura 0.2	Puente Morandi colapsado en Génova, Italia, el 14 de agosto de 2018	3
Figura 1.1	Puente Río Papaloapan	7
Figura 1.2	Dibujo del PRP mostrando dimensiones generales e identificación de semiarpas	7
Figura 1.3	Diseño de ensamble del sistema de anclaje superior	8
Figura 1.4	Falla en elemento de anclaje del tirante 1 semiarpa 5 (T1S5)	9
Figura 1.5	Diagrama de distribución de sensores colocados en el puente	10
Figura 2.1	Representación de la FFT, mostrando su capacidad para exhibir únicamente los contenidos de frecuencia	11
Figura 2.2	Representación de la STFT, mostrando su capacidad para exhibir simultáneamente información de tiempo-frecuencia de una señal	12
Figura 2.3	Representación de la CWT, mostrando su capacidad para exhibir características de multirresolución de una señal usando una <i>wavelet</i> de tamaño variable	13
Figura 2.4	Onda madre de sombrero mexicano (<i>Mexican hat mother wavelet</i>)	15
Figura 3.1	Elementos ANSYS® utilizados para el modelo MEF	18
Figura 3.2	Modelo MEF en ANSYS® y sus primeras seis formas modales principales/frecuencias	19
Figura 4.1	Espectrogramas a partir de las señales de aceleración para puente sano	22
Figura 4.2	Espectrogramas a partir de las señales de aceleración para puente con tablero dañado a 0.25L	22

		Página
Figura 4.3	Diagramas CWT a partir de las señales de aceleración originales para el caso de puente sano. Tres diferentes posiciones de medición (de arriba a abajo: 0.25L, 0.50L y 0.75L)	23
Figura 4.4	Diagramas CWT a partir de las señales de aceleración originales para el caso de tablero del puente dañado a 0.25L. Tres diferentes posiciones de medición (de arriba a abajo: 0.25L, 0.50L y 0.75L)	24
Figura 4.5	Diagrama CWT a partir de la resta y extensión de las señales de aceleración para la posición de medición a 0.50L y posición del daño a 0.25L, mostrando con un rectángulo amarillo la región importante para calcular la EW	25
Figura 4.6	Diagramas CWT a partir de las señales de aceleración para el área de interés para el caso de puente sano. Tres diferentes posiciones de medición (de arriba a abajo: 0.25L, 0.50L y 0.75L)	25
Figura 4.7	Diagramas CWT a partir de las señales de aceleración para el área de interés para el caso de tablero del puente dañado a 0.25L. Tres diferentes posiciones de medición (de arriba a abajo: 0.25L, 0.50L y 0.75L)	26
Figura 4.8	EW total a partir de las señales de aceleración para el caso de puente sano. Tres diferentes posiciones de medición (de arriba a abajo: 0.25L, 0.50L y 0.75L)	27
Figura 4.9	EW total a partir de las señales de aceleración para el caso de tablero del puente dañado a 0.25L. Tres diferentes posiciones de medición (de arriba a abajo: 0.25L, 0.50L y 0.75L)	28
Figura 4.10	EW total a partir de las señales de aceleración para diferentes posiciones de medición y promedio respectivo para el caso de puente sano. Tres diferentes condiciones de las señales (de arriba a abajo: original, ruidosa y filtrada)	29
Figura 4.11	EW total a partir de las señales de aceleración para diferentes posiciones de medición y promedio respectivo para el caso de tablero del puente dañado a 0.25L. Tres diferentes condiciones de las señales (de arriba a abajo: original, ruidosa y filtrada)	30

		Página
Figura 4.12	EW total promedio a partir de las señales de aceleración para puente sano y tablero del puente dañado a 0.25L. Tres diferentes condiciones de las señales (de arriba a abajo: original, ruidosa y filtrada)	31
Figura 4.13	Diagramas CWT a partir de las señales de aceleración para el área de interés para tablero del puente dañado a 0.50L y diferentes condiciones de las señales: (a) ruidosas y (b) filtradas. Tres diferentes posiciones de medición para cada caso (de arriba a abajo: 0.25L, 0.50L y 0.75L)	32
Figura 4.14	Diagramas CWT a partir de las señales de aceleración para el área de interés para tablero del puente dañado a 0.75L y diferentes condiciones de las señales: (a) ruidosas y (b) filtradas. Tres diferentes posiciones de medición para cada caso (de arriba a abajo: 0.25L, 0.50L y 0.75L)	32
Figura 4.15	EW total promedio a partir de las señales de aceleración para puente sano y tablero del puente dañado a 0.50L. Tres diferentes condiciones de las señales (de arriba a abajo: original, ruidosa y filtrada)	33
Figura 4.16	EW total promedio a partir de las señales de aceleración para puente sano y tablero del puente dañado a 0.75L. Tres diferentes condiciones de las señales (de arriba a abajo: original, ruidosa y filtrada)	33
Figura 4.17	Diagramas CWT a partir de las señales de desplazamiento originales: (a) puente sano y (b) tablero del puente dañado a 0.25L. Tres diferentes posiciones de medición para cada caso (de arriba a abajo: 0.25L, 0.50L y 0.75L)	35
Figura 4.18	Diagramas CWT a partir de las señales de desplazamiento para el área de interés: (a) puente sano y (b) tablero del puente dañado a 0.25L. Tres diferentes posiciones de medición para cada caso (de arriba a abajo: 0.25L, 0.50L y 0.75L)	36
Figura 4.19	Diagramas CWT a partir de las señales de desplazamiento para el área de interés y mostrando los coeficientes en vez de la escala: (a) puente sano y (b) tablero del puente dañado a 0.25L. Tres diferentes posiciones de medición para cada caso (de arriba a abajo: 0.25L, 0.50L y 0.75L)	36

		Página
Figura 4.20	EW total promedio a partir de las señales de desplazamiento originales para puente sano y tablero del puente dañado a 0.25L	36
Figura 4.21	Diagramas CWT a partir de las señales de desplazamiento filtradas para el área de interés: (a) puente sano, (b) tablero del puente dañado a 0.25L, (c) tablero del puente dañado a 0.50L y (d) tablero del puente dañado a 0.75L. Tres diferentes posiciones de medición para cada caso (de arriba a abajo: 0.25L, 0.50L y 0.75L)	37
Figura 4.22	EW total promedio a partir de las señales de desplazamiento filtradas: (a) puente sano vs. tablero del puente dañado a 0.25L, (b) puente sano vs. tablero del puente dañado a 0.50L y (c) puente sano vs. tablero del puente dañado a 0.75L	38
Figura 4.23	EW total promedio a partir de las señales de aceleración filtradas: (a) puente sano vs. tablero del puente dañado con reducción de 0.10h, (b) puente sano vs. tablero del puente dañado con reducción de 0.20h, (c) puente sano vs. tablero del puente dañado con reducción de 0.30h, (d) puente sano vs. tablero del puente dañado con reducción de 0.40h y (e) puente sano vs. tablero del puente dañado con reducción de 0.50h. Todos los casos de daño a 0.25L	39
Figura 4.24	EW total promedio a partir de las señales de aceleración filtradas para puente sano y tablero del puente dañado a 0.25L con diferente severidad	40
Figura 4.25	Diagramas CWT a partir de las señales de desplazamiento originales: (a) puente sano, (b) puente con tirante dañado a 0.77L y (c) puente con tirante dañado a 0.42L. Tres diferentes posiciones de medición para cada caso (de arriba a abajo: 0.33L, 0.50L y 0.66L)	42
Figura 4.26	Diagramas CWT a partir de las señales originales de desplazamiento restadas: (a) puente con tirante dañado a 0.77L y (b) puente con tirante dañado a 0.42L. Tres diferentes posiciones de medición para cada caso (de arriba a abajo: 0.33L, 0.50L y 0.66L)	42
Figura 4.27	Diagramas CWT a partir de las señales de desplazamiento originales para el área de interés: (a) puente sano, (b) puente con tirante dañado a 0.77L y (c) puente con tirante dañado a 0.42L. Tres diferentes posiciones de medición para cada caso (de arriba a abajo: 0.33L, 0.50L y 0.66L)	43

		Página
Figura 4.28	Diagramas CWT a partir de las señales de desplazamiento originales para el área de interés para puente con tirante dañado a 0.77L y 3 diferentes posiciones de medición (de arriba a abajo: 0.33L, 0.50L y 0.66L), mostrando la magnitud de los coeficientes	43
Figura 4.29	EW total promedio a partir de las señales de desplazamiento filtradas: (a) puente sano vs. puente con tirante dañado a 0.77L y (b) puente sano vs. puente con tirante dañado a 0.42L	44
Figura 5.1	Espectrogramas a partir de las señales experimentales filtradas: (a) puente sano y (b) tirante dañado T1S5	47
Figura 5.2	Diagramas CWT a partir de las señales experimentales filtradas de puente sano para el área de interés: (a) mostrando la escala en el eje vertical y (b) mostrando los coeficientes en el eje vertical. Tres diferentes posiciones de medición para cada caso (de arriba a abajo: R1, R2 y R4)	49
Figura 5.3	Diagramas CWT a partir de las señales experimentales filtradas de puente con tirante dañado T1S5 para el área de interés: (a) mostrando la escala en el eje vertical y (b) mostrando los coeficientes en el eje vertical. Tres diferentes posiciones de medición para cada caso (de arriba a abajo: R1, R2 y R4)	49
Figura 5.4	Diagrama CWT a partir de la señal experimental filtrada de la posición de medición R2 alrededor del momento del colapso del tirante T1S5: (a) mostrando la escala en el eje vertical y (b) mostrando los coeficientes en el eje vertical	49
Figura 5.5	EW total a partir de las señales experimentales filtradas: (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)	50
Figura 5.6	EW total promedio a partir de las señales experimentales filtradas para puente sano vs. puente con tirante dañado T1S5	50

Índice de tablas

		Página
Tabla 4.1	Análisis de severidad de daño para diferentes magnitudes de daño en el tablero del puente a 0.25L presentadas en las figuras 4.23 y 4.24.	40

Sinopsis

En este trabajo se presenta el método desarrollado para detectar y localizar daño en puentes vehiculares llamado “método de acumulación de energía *wavelet* (MAEW)”.

Este método se basa en el posprocesamiento, mediante la *Continuous Wavelet Transform* (CWT), de las señales adquiridas en el puente cuando un vehículo lo cruza. La selección adecuada del filtro, *mother wavelet* y rango de escala, así como la eliminación de los efectos de borde, ayuda a que los diagramas CWT se clarifiquen y el daño resalte, de tal forma que el correspondiente cálculo de la energía *wavelet* (EW) indicará si existe daño y su ubicación. La EW de un puente sano es baja y plana, mientras que para un puente dañado la EW se acumula en la ubicación del daño.

El puente seleccionado para validar el método fue el puente Río Papaloapan (PRP). Los resultados obtenidos usando los datos provenientes del monitoreo de este puente, así como aquellos obtenidos a partir de simulaciones numéricas, son muy promisorios. Por tanto, este método de identificación de daño, cuya implementación sería de bajo costo, podría usarse en los puentes para evitar colapsos con las correspondientes fatalidades humanas y pérdidas económicas, como ha sucedido en diferentes países.

Abstract

This publication presents the method developed to detect and localize damage on vehicular bridges called “Wavelet Energy Accumulation Method (WEAM)”.

This method is based on post-processing, by means of Continuous Wavelet Transform (CWT), of the signals acquired on a bridge while a vehicle is crossing it. The proper selection of the filter, mother wavelet and scale range, as well as the elimination of border effects, help to make CWT diagrams clearer and the damage is highlighted; in this way the corresponding calculation of the Wavelet Energy (WE) will indicate if there is damage and its location. The WE of a healthy bridge is low and flat, whereas for a damaged bridge the WE is accumulated at the damage location.

The bridge selected to validate this method was the Rio Papaloapan Bridge (RPB). Results obtained using data from monitoring this bridge, as well as those obtained from numerical simulations, are very promising. Therefore, this method of damage identification, whose implementation would be low cost, could be used on bridges to avoid collapses with the corresponding human fatalities and economic losses, as has happened in different countries.

Resumen ejecutivo

En este trabajo se desarrolló el método de acumulación de energía *wavelet* (MAEW) para detectar y localizar daño en puentes vehiculares y se aplicó en el puente atirantado Río Papaloapan (PRP) para su validación. Este método se fundamenta en la técnica propuesta en 2012 para identificar daño en estructuras tipo viga [1].

Primeramente, se creó un modelo numérico detallado del PRP basado en el método del elemento finito (MEF) usando el programa ANSYS®, a fin de estudiar diferentes escenarios de daño, incluidos daño en el tablero y daño en los tirantes (simulando en un caso la falla del tirante que colapsó en el puente real en el año 2015: tirante 1 de la semiarpa 5 - T1S5). Las respuestas transitorias numéricas obtenidas mientras una fuerza 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 posprocesaron con un código escrito en MATLAB®, el cual proporciona la energía *wavelet* (EW) y determina si existe algún daño y su ubicación.

El MAEW consiste en medir y registrar las señales de vibración (desplazamiento o aceleración) en diferentes puntos distribuidos uniformemente a lo largo del tablero del puente, mientras un vehículo con velocidad baja y constante cruza el puente; luego esas señales y las correspondientes del puente sano (*baseline* o de referencia) se restan y la *Continuous Wavelet Transform* (CWT) se aplica tanto a las señales sanas como a las restadas, para obtener los correspondientes diagramas de colores tridimensionales con una amplia gama de escala. Posteriormente, la comparación entre los diagramas CWT sanos y posiblemente dañados (restados) debe proporcionar una pista sobre dónde se encuentra el daño (en caso de existir) y, por lo tanto, los efectos de borde deben eliminarse mediante las extensiones de las señales en ambos lados (izquierdo y derecho), y debe considerarse un rango conveniente de escala para aclarar los diagramas CWT y hacer más evidente la presencia de daño. Finalmente, la EW se obtiene calculando el área bajo la curva para el rango de escala seleccionado y a lo largo del tablero del puente. La energía de un puente sano es baja y plana, mientras que para un puente dañado hay una acumulación de EW en la ubicación del daño, sin importar si se considera cada medición individual o el promedio de todas las mediciones.

Este método es más eficiente mediante la aplicación de un filtro adecuado en las señales antes de la resta y seleccionando la onda madre (*mother wavelet*) más conveniente (filtro Savitzky-Golay y *Mexican hat mother wavelet*, para los casos estudiados).

Independientemente de que el MAEW sea útil como una prueba controlada y que la falla del PRP haya sucedido antes de que se pudiera aplicar este método, los datos adquiridos para el PRP cuando estaba sano y cuando se rompió un tirante se analizaron con este método usando las mediciones más útiles de los monitoreos y la detección de daño fue posible. Por lo tanto, este método es prometedor para aplicarse sistemáticamente en los puentes principales del país y evitar accidentes como el ocurrido en el PRP.

Palabras clave: puente Río Papaloapan, identificación de daño, método de acumulación de energía *wavelet*.

Introducción

Las estructuras civiles modernas son cada vez más complejas en tamaño y diseño; nuevos conceptos y materiales se utilizan cada vez más, y las condiciones ambientales y operativas resultan más demandantes. Además, las estructuras son ahora componentes importantes de sistemas integrados (por ejemplo, los puentes en sistemas integrados de transporte), donde es necesario evaluar continuamente la condición estructural y, en algunos casos, se requiere en tiempo real [2]. Al mismo tiempo, son tales los avances en la tecnología de sensores y su instrumentación que cada vez surgen nuevas alternativas y posibilidades para la medición, evaluación y control de sistemas de ingeniería. El uso de múltiples sensores de diferentes tipos se ha vuelto posible y se presentan escenarios en los que se utilizan miles de sensores embebidos en estructuras inteligentes [3, 4]. En estas condiciones, el monitoreo de salud estructural (SHM, por sus siglas en inglés) de estructuras nuevas y el desarrollo de tecnologías originales en sensores ofrecen nuevos desafíos para el desarrollo de teorías innovadoras y esquemas experimentales [5].

La evaluación estructural para determinar daño, deterioro o condiciones anormales de operación en estructuras civiles complejas es esencial para determinar la confiabilidad operacional y vida residual de las mismas [2]. Tradicionalmente, la mayoría de los programas de detección de daño se basan en inspecciones visuales, que son costosas y limitadas por el acceso a todas las partes de la estructura. Adicionalmente, el daño interno no es detectable con una inspección visual y no es posible obtener una estimación cuantitativa del daño o de la capacidad estructural remanente. Sistemas recientes para el monitoreo de la salud de estructuras incluyen diferentes pruebas no destructivas, pero en todos los casos la evaluación es localizada y no permite evaluaciones globales de las estructuras [6].

Hasta ahora, se ha reconocido que el análisis de vibraciones y el análisis modal son las únicas técnicas que tienen el potencial para llevar a cabo una evaluación global de estructuras [2, 7]. En estos casos, el monitoreo de la salud se realiza analizando los cambios del comportamiento característico de vibración a través de las frecuencias naturales, relaciones de amortiguamiento y formas modales. En general, un modelo sin daño, típicamente usando el método del elemento finito (MEF), se utiliza como referencia, y la identificación del daño se realiza comparando las respuestas del modelo con los resultados experimentales en la estructura real. Muchos algoritmos se han desarrollado para realizar dicha comparación, pero en general, se clasifican considerando cuatro diferentes aproximaciones: optimización de matrices, métodos de sensibilidad, técnicas de asignación de valores característicos y métodos de perturbación de mínimo rango [8].

Detectar a tiempo daño en puentes juega un papel muy importante para la seguridad y confiabilidad, ya que este tipo de estructuras sujetas a cargas móviles tienden a acumular daño que usualmente es causado por deterioro de algunos elementos durante su vida de servicio. El no detectar a tiempo algún tipo de daño en puentes puede provocar la falla de los mismos y, por consiguiente, fatalidades humanas, además de grandes pérdidas económicas. Por tanto, para el caso particular de estas obras civiles, aún es necesario aumentar los esfuerzos orientados a proporcionar métodos más sofisticados y confiables para la identificación temprana de daño.

A lo largo de la historia se han documentado casos de accidentes de puentes con consecuencias catastróficas, incluso en los países más desarrollados del mundo. Una de las primeras tragedias fue el accidente llamado “Ashtabula River Railroad Disaster”, causado por la falla de un puente en el noreste de Ohio, EUA, en 1876. El puente se fracturó mientras un tren pasaba y se hundió 21 metros en el agua; 64 personas resultaron heridas y 92 murieron. La razón del colapso del puente fue falla por fatiga de piezas de hierro fundido, las cuales se usaban para anclar las barras de hierro forjado de la armadura. Este desastre ayudó a centrar los esfuerzos en la elaboración de normas para los puentes, incluyendo pruebas e inspecciones adecuadas [9].

Sólo tres años más tarde se produjo un accidente similar en Escocia, Reino Unido, cuando el puente ferroviario Tay se derrumbó durante una tormenta, mientras un tren pasaba por encima, lo que causó la pérdida de 75 vidas humanas. El puente falló debido al deterioro estructural y la fuerza del viento superior a la estimada [10]. Por otra parte, en el año 1967, el puente Silver, estructura colgante que conectaba dos ciudades sobre el río Ohio, en Estados Unidos, se derrumbó durante la hora de mayor tránsito vehicular, lo que provocó 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 [11].

De forma similar, recientemente falló el puente 9340 a la hora pico del 1 de agosto de 2007 con su colapso en el río Misisipi, en Mineápolis, Minesota, Estados Unidos. Trece personas murieron y 145 resultaron heridas (figura 0.1). 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, tras el incidente, 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 [12].



Figura 0.1. Puente 9340 visto desde arriba después del colapso en Minesota, EUA, el 1 de agosto de 2007.

Finalmente, otro ejemplo trágico ocurrió el 14 de agosto de 2018. Durante una fuerte tormenta colapsó una sección de 210 metros del puente Morandi, en la ciudad portuaria de Génova, en Italia (figura 0.2), lo que fue uno de los derrumbes más graves de puentes en Europa. Como consecuencia del derrumbe, se desplomaron tres camiones y 35 automóviles desde 45 metros de altura a una montaña de escombros. La mayoría de los vehículos y de la estructura cayeron dentro del río Polcevera; otros se desplomaron sobre los almacenes de la compañía eléctrica Ansaldo Energía y sobre las vías de ferrocarril de las rutas Génova-Turín y Génova-Milán, y alrededor de 43 personas murieron, según las autoridades.



Figura 0.2. Puente Morandi colapsado en Génova, Italia, el 14 de agosto de 2018.

El arquitecto Diego Zoppi explicó que el problema del puente Morandi estribó en que los tirantes se construyeron en concreto y no en metal, y en los años 60 (cuando se construyó) no se tomaba en cuenta que el concreto se degrada y luego colapsa. Zoppi agregó que hace 50 años había una confianza ilimitada en el hormigón, se creía que era eterno, pero se comprendió luego que sólo dura algunas décadas [13].

Los accidentes descritos anteriormente son algunos ejemplos que muestran la necesidad de proveer métodos eficientes para evaluar el estado estructural de los puentes y detectar daño antes de que colapsen estas construcciones. Muchos investigadores han estudiado esta problemática con grandes avances, pero aún se requiere profundizar más para lograr implementar métodos adecuados en este tipo de estructuras.

Algunos de los métodos de detección de daño más utilizados en puentes se basan en inspecciones visuales o pruebas localizadas, tales como ultrasonido, partículas magnéticas, líquidos penetrantes y corrientes de Eddy. Sin embargo, la desventaja de estas evaluaciones no destructivas es que no pueden aplicarse eficientemente a estructuras grandes y complejas, como en el caso de los puentes, ya que el acceso a muchas de sus partes no es fácil para su examen visual, mientras que los métodos de pruebas localizadas sólo pueden llevarse a cabo en algunos elementos donde las posibilidades de sufrir un daño son mayores o en ubicaciones donde estudios previos sugirieron la presencia de un daño. Entonces, el daño podría acumularse en secciones no evaluadas y crecer hasta la fractura y colapso de la estructura.

Asimismo, se debe tener en cuenta que muchos puentes vehiculares en todo el mundo podrían presentar errores en el diseño civil o una selección incorrecta de materiales, y peor aún, podrían estar operando más allá de su vida útil o sobrecargados, lo que incrementa las probabilidades de daño estructural y el riesgo de colapso ante una detección no oportuna.

Por lo tanto, en las últimas tres décadas, se han utilizado ampliamente las estrategias de detección de daño basadas en análisis de las mediciones de vibración para el monitoreo de salud estructural, porque superan las limitaciones de las técnicas mencionadas arriba. Actualmente, el uso de las señales de vibración de los puentes todavía se considera la forma más promisoría de detectar daño no visible en este tipo de estructuras civiles en un modo global y en línea; sin embargo, esas señales tienen que posprocesarse, de tal manera que se puedan desarrollar e implementar métodos de detección de daño en puentes con baja cantidad de falsas alarmas y asegurando la confiabilidad en su aplicación.

La cantidad e importancia de los métodos de vibración basados en *wavelets* para la detección de daño en puentes ha aumentado significativamente en la última década. Algunas de esas investigaciones se mencionan a continuación:

Machorro *et al.* [1] presentaron en 2012 una técnica basada en la energía *wavelet* (EW) para identificar daño en estructuras tipo viga sometidas a cargas móviles. Los correspondientes diagramas de la *Continuous Wavelet Transform* (CWT), usando

las respuestas vibratorias generadas con sus modelos analíticos y numéricos, mostraron que el daño es susceptible de detectarse y localizarse incluso con porcentajes significativos de ruido. El incremento repentino de EW puede indicar la presencia de daño, y la posición de este incremento de energía está relacionada con la ubicación del daño y la posición de la carga en movimiento que pasa a través de la viga. Experimentos de laboratorio validaron su investigación.

De forma similar, Golmohamadi *et al.* [14] usaron una técnica basada en *wavelets* para evaluar el daño en puentes usando la energía de los coeficientes *wavelets*. Para ello, usaron CWT en casos de modelos numéricos de puentes sanos y con daño; posteriormente, calcularon la energía total de los coeficientes *wavelets* como índice de sensibilidad al daño.

Asimismo, McGetrick y Kim [15] investigaron la factibilidad de un método alternativo de bajo costo basado en *wavelets* para el monitoreo periódico de puentes, que consiste en el uso de un vehículo instrumentado con acelerómetros en sus ejes. Encontraron que el daño puede localizarse con mayor precisión para velocidades bajas de vehículos y puentes largos, indicando el nivel de daño por el coeficiente máximo del *Wavelet Transform* (WT) a partir de ondas madre tipo Morlet.

Por otro lado, hay trabajos desarrollados por Reddy y Swarnamani [16] y Walia *et al.* [17] enfocados en analizar la sensibilidad de los coeficientes *wavelets* para detectar y cuantificar el daño en las estructuras.

Recientemente, Quiñones y Montejo [18] evaluaron dos técnicas basadas en *wavelets* para identificar daño en estructuras civiles. La primera técnica se basó en analizar la evolución de las frecuencias de la estructura mediante CWT; mientras que, con la segunda técnica, analizaron las singularidades generadas en frecuencias altas de la respuesta de la estructura a través de funciones obtenidas con FWT (*Fast Wavelet Transform*). La conclusión de la investigación fue que los parámetros *wavelets* deben elegirse en función del contenido frecuencial esperado en la estructura y es preciso llevar a cabo ambos análisis para asegurar la eficiencia en la detección de daño.

Zhu y Sun [19] desarrollaron un nuevo índice de detección de daño en puentes basado en el cambio de EW. Sus resultados numéricos basados en un modelo de viga simplemente apoyada demuestran que con dicho índice se puede detectar y ubicar el daño en la estructura de manera válida. Sin embargo, en sus simulaciones sólo aplican excitación constante y, en la realidad, el daño podría estar enmascarado por el efecto de la excitación ambiental, el ruido experimental y otras incertidumbres.

Los inconvenientes que enfrentaron Zhu y Sun se abordaron en el trabajo efectuado por Li y Li [20], quienes propusieron el índice que denominaron *Energy Spectrum Anomaly Measure* (ESAM), para identificar la existencia de daño en estructuras civiles. Ese índice se basa en la respuesta de impulso virtual y en WT. Su investigación estuvo fundamentada en un modelo numérico de tres grados de

libertad (GDL) y demostraron que su índice es sensible y confiable para identificar daño aún en condiciones de ruido.

Chen y Oyadiji [21] presentaron un novedoso índice *wavelet* de modo múltiple utilizando DWT (*Discrete Wavelet Transform*) de las curvas de frecuencia modal para identificar daño estructural. Con modelos MEF y experimentos de laboratorio demostraron el funcionamiento del método propuesto. Los resultados sugieren que el índice desarrollado proporciona una identificación inequívoca de daño, en comparación con la resolución deficiente que ofrecen los típicos diagramas de WT para detectar daño en la región de alta frecuencia cuando existen componentes de alta frecuencia.

Finalmente, Ercolani *et al.* [22] mostraron la implementación de la CWT para detectar daño en un modelo numérico de un puente con losa de hormigón pretensado, analizado con el MEF. Incluyeron distintos tipos de daño en el modelo estructural, obtuvieron los desplazamientos verticales de la estructura bajo la acción de cargas estáticas y demostraron la utilidad del WT para la detección de los daños.

México, como la mayoría de los países, necesita contar con un sistema integral eficiente de monitoreo de sus principales puentes para conocer en todo momento su condición estructural y evitar fallas catastróficas. En nuestro país existe una gran cantidad de puentes, y un porcentaje significativo de ellos se encuentran deteriorados, sin un mantenimiento adecuado y sin saber si presentan algún tipo de daño que pueda derivar en su colapso. Aunado a ello, si se toma en cuenta que muchos de los puentes se encuentran operando desde hace décadas en regiones sísmicas o con condiciones ambientales hostiles, y que además, desde el diseño o construcción pudieron existir errores, las probabilidades de que se presente una falla se incrementan.

Desde hace aproximadamente 10 años, los investigadores del Grupo de Monitoreo Estructural, perteneciente a la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural (CIVIE) del Instituto Mexicano del Transporte (IMT) han orientado esfuerzos para implementar nuevas estrategias en la gestión, administración y evaluación del inventario nacional de puentes. Algunas de las estrategias han ido encaminadas a la actualización y modernización de los Sistemas de Puentes en México (Sipumex) y otras a la evaluación de la condición estructural de los puentes más importantes del país mediante la creación del Centro de Monitoreo de Puentes y Estructuras Inteligentes (CMPEI), cuyos objetivos son, por una parte, garantizar la seguridad de los usuarios y de los puentes monitoreados, y por otra, optimizar el uso de los recursos financieros destinados a la conservación de la infraestructura, a través de la detección oportuna de daño, la aplicación de mantenimiento preventivo y la extensión de la vida útil de las estructuras.

En este trabajo se muestran los resultados del desarrollo y la aplicación del método basado en *wavelets*, llamado "método de acumulación de energía *wavelet* (MAEW)" para detectar daño en puentes vehiculares, considerando para ese objetivo la estructura atirantada puente Río Papaloapan (PRP).

1 Descripción del puente Río Papaloapan, fallas principales y su sistema SHM

El puente Río Papaloapan (PRP) es una estructura atirantada ubicada en el estado de Veracruz, en México. Construido en 1994, tiene un tramo principal de 203 metros y una longitud total de 407.21 metros con 112 tirantes distribuidos en 8 semiarpas (figura 1.1 y figura 1.2). La numeración de los tirantes para cada semiarpa es del 1 al 14, siendo el número 1 el más corto y el 14 el más largo. Debido a las dimensiones e importancia del PRP, así como a las fallas importantes que ha presentado, se seleccionó este puente para el desarrollo de la presente investigación.



Figura 1.1. Puente Río Papaloapan.

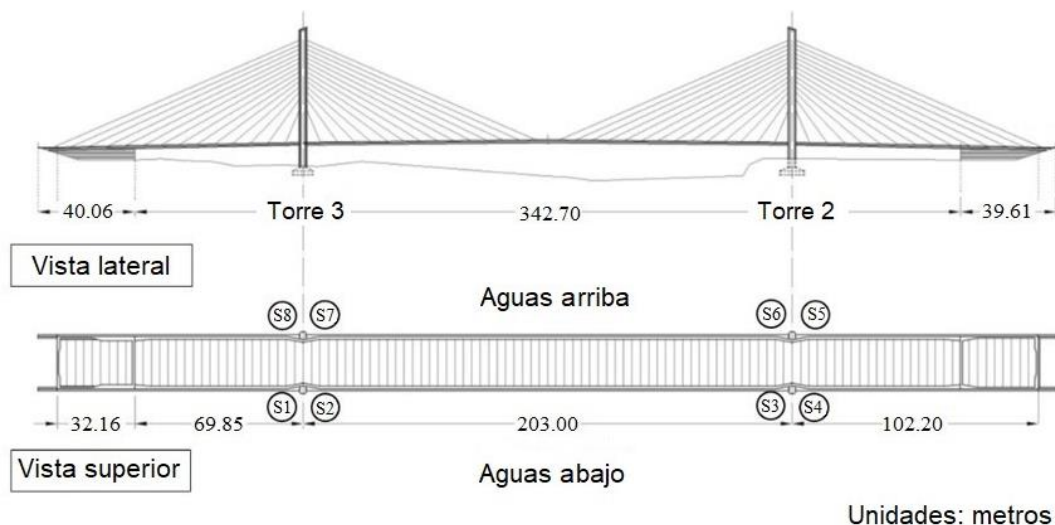


Figura 1.2. Dibujo del PRP mostrando dimensiones generales e identificación de semiarpas.

El diseño del sistema de anclaje superior [23] consiste en una placa de acero soldada a los elementos de anclaje, los cuales son cilíndricos de un lado y planos en el lado soldado (figura 1.3). El lado cilíndrico está roscado para atornillar el collar que sostiene el tirante en la parte superior.

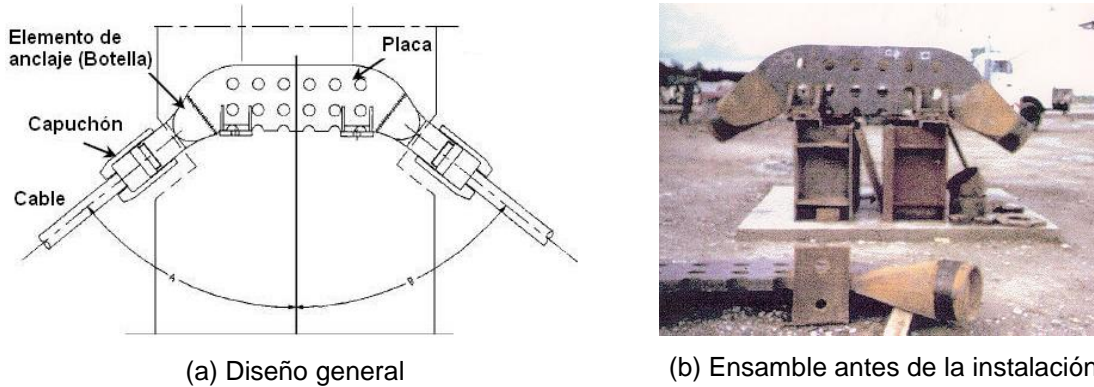


Figura 1.3. Diseño de ensamble del sistema de anclaje superior.

Este puente, hasta ahora, ha tenido dos fallas principales en los elementos de anclaje. La primera ocurrió en enero de 2000 y se debió a deficiencias microestructurales del acero. 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 [24, 25]. En este caso, los defectos en la zona afectada por el calor crecieron debido a la fatiga hasta la fractura completa [26]. 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 semiarpa 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 [27].



Figura 1.4. Falla en elemento de anclaje del tirante 1 semiarpa 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 sistema 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 CMPEI en el 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 semiarpa (figura 1.5).

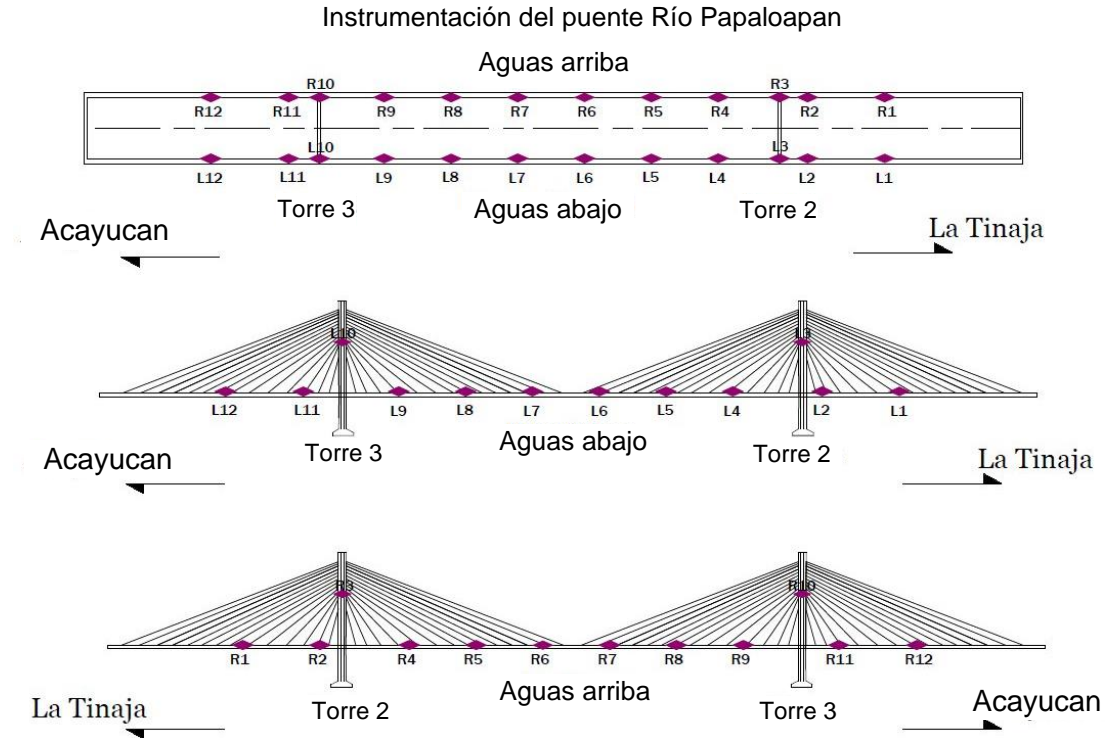


Figura 1.5. Diagrama de distribución de sensores colocados en el puente.

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 propone un método confiable para la identificación de daño y evitar fallas en los puentes.

2 *Continuous Wavelet Transform (CWT)*

Las *wavelets* son muy útiles para procesar los datos de vibración estructural y realizar análisis con el fin de evaluar una estructura, ya que esta herramienta proporciona información que ni la *Fast Fourier Transform* (FFT) ni la *Short Time Fourier Transform* (STFT) pueden mostrar.

La FFT convierte una señal de su dominio original (tiempo) en una representación en el dominio de la frecuencia. Como se muestra en la figura 2.1, al transformar una señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, la información del tiempo se pierde y es imposible determinar cuándo ocurrió un evento en particular.

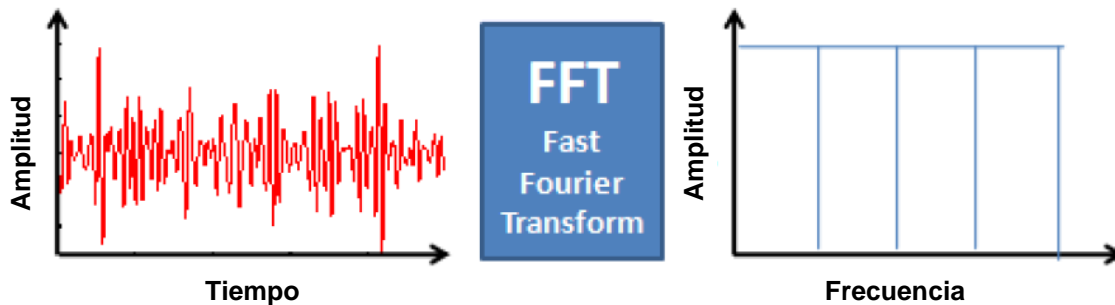


Figura 2.1. Representación de la FFT, mostrando su capacidad para exhibir únicamente los contenidos de frecuencia.

Por otro lado, la STFT es una secuencia de transformadas de Fourier de una señal en ventana. La STFT proporciona la información de frecuencia localizada en el tiempo para situaciones en las que las componentes de frecuencia de una señal varían con el tiempo, mientras que la transformada de Fourier estándar proporciona la información de frecuencia promediada durante todo el intervalo de tiempo de la señal. Sin embargo, la principal desventaja de la STFT es el ancho fijo de la ventana deslizante, que limita la resolución en frecuencia (figura 2.2).

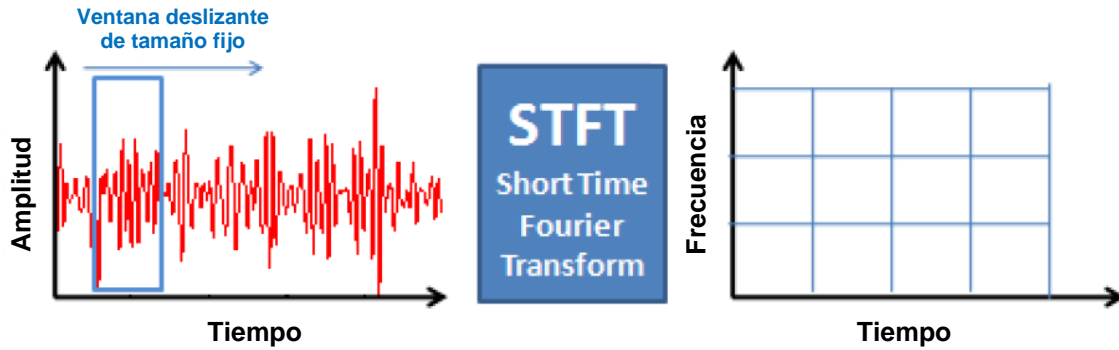


Figura 2.2. Representación de la STFT, mostrando su capacidad para exhibir simultáneamente información de tiempo-frecuencia de una señal.

Una *wavelet* es una oscilación en forma de onda con una amplitud que comienza en cero, aumenta y luego disminuye de nuevo a cero; es decir, las *wavelets* son pequeñas ondas (señales) altamente localizadas en el tiempo que descienden rápidamente a cero después de algunas oscilaciones, y tienen un valor promedio nulo, como las señales grabadas por un monitor cardíaco. En general, las *wavelets* están diseñadas intencionalmente para tener propiedades específicas que las hacen útiles para el procesamiento de señales; como herramienta matemática, las *wavelets* se pueden utilizar para extraer información de muchos tipos diferentes de datos.

La *Wavelet Transform* (WT) es una de las técnicas más importantes en el procesamiento de señales para construir un marco en la identificación de propiedades modales. Como herramienta de análisis de tiempo-frecuencia, WT tiene la ventaja de tratar con señales no estacionarias, transitorias y no lineales.

La *Continuous Wavelet Transform* (CWT) es una de las formas más utilizadas de WT, la cual proporciona una representación en tiempo-frecuencia de una señal mediante el uso simultáneo de una técnica de ventanas de tamaño variable (ver figura 2.3). La CWT descompone la señal en una serie de pequeñas ondas o "*wavelets*"; esas *wavelets* pueden ser funciones reales o complejas, y existe una familia de *wavelets* disponible. Para cada aplicación, una determinada *wavelet* puede ser más apropiada que otras, pero en general, para encontrarla, se requiere un proceso de prueba y error. La *wavelet* seleccionada se llama *mother wavelet* (onda madre) y puede ser una función del espacio o el tiempo. Así, la CWT se genera eligiendo una simple *mother wavelet*, y luego formando una familia continua de *wavelets* trasladando y dilatando la *mother wavelet*; esto se utiliza para evaluar secuencialmente la similitud entre la *mother wavelet* y una parte de la señal que se analizará en todo el tiempo. Las *wavelets* con escalas más finas son un indicador de información de alta frecuencia de la señal, mientras que las *wavelets* con escalas más gruesas son apropiadas para capturar componentes de baja frecuencia. Como resultado, cualquier irregularidad o discontinuidad en las señales, que no son visibles fácilmente mediante inspecciones visuales o métodos convencionales, puede exhibir valores altos de coeficientes a través de la CWT [28].

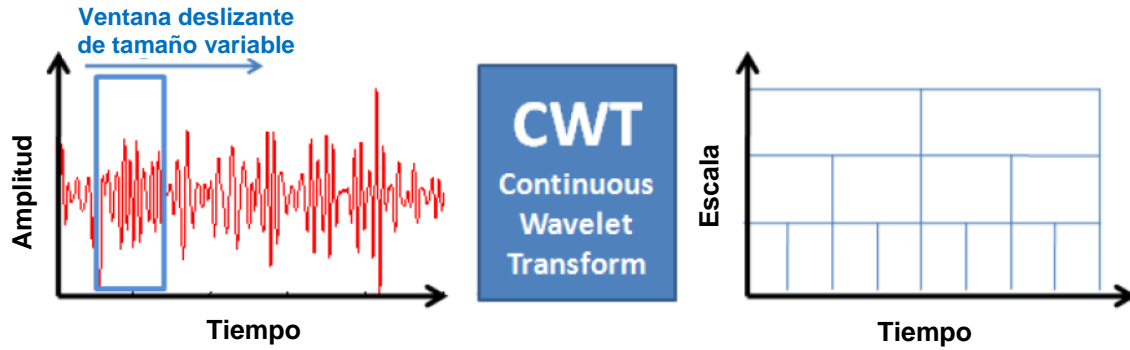


Figura 2.3. Representación de la CWT, mostrando su capacidad para exhibir características de multirresolución de una señal usando una *wavelet* de tamaño variable.

De esta manera, mientras la FFT descompone una señal en senos y cosenos de longitud infinita, con lo que efectivamente se pierde toda la información de localización en el tiempo, la CWT se utiliza para construir una representación en tiempo-frecuencia de una señal que ofrece muy buena localización en tiempo y frecuencia. La CWT es una excelente herramienta para mapear los cambios de propiedades de señales no estacionarias.

Entonces, una función *mother wavelet* se define como [29]:

$$\psi(t) \in L^2(\mathbb{R}), \quad (1)$$

la cual está limitada en el dominio del tiempo. Es decir, $\psi(t)$ tiene valores en un cierto rango y ceros en otros lugares. Otra propiedad de una *mother wavelet* es la media cero; la otra propiedad es que la *mother wavelet* está normalizada. Matemáticamente, esas dos últimas propiedades se representan como:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (2)$$

$$\|\psi(t)\|^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) \psi^*(t) dt = 1. \quad (3)$$

Como indican las propiedades de traslación y dilatación, la *mother wavelet* puede formar un conjunto base denotado por:

$$\left\{ \psi_{s,u}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-u}{s}\right) \right\}_{u \in \mathbb{R}, s \in \mathbb{R}_+}. \quad (4)$$

donde u es el parámetro de traslación, que indica la región que concierne. Mientras que s es el parámetro de escala mayor que cero porque la escala negativa es indefinida. La propiedad multirresolución garantiza que el conjunto obtenido $\{\psi_{s,u}(t)\}$ sea ortonormal. Así, el CWT es el coeficiente de la base $\psi_{s,u}(t)$, es decir,

$$Wf(s, u) = \langle f(t), \psi_{s,u} \rangle \quad (5)$$

$$Wf(s, u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{s,u}^*(t) dt \quad (6)$$

$$Wf(s, u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^* \left(\frac{t-u}{s} \right) dt. \quad (7)$$

A través de esta transformada, es posible mapear una señal unidimensional $f(t)$ a coeficientes bidimensionales $Wf(s, u)$. Ambas variables permiten realizar el análisis de tiempo-frecuencia. Luego, se puede indicar la ubicación de una frecuencia particular (parámetro s) en un determinado instante de tiempo (parámetro u).

Si $f(t)$ es una función $L^2(\mathbb{R})$. El inverso de CWT es:

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty Wf(s, u) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi \left(\frac{t-u}{s} \right) du \frac{ds}{s^2}, \quad (8)$$

donde C_ψ se define como:

$$C_\psi = \int_0^\infty \frac{|\Psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty. \quad (9)$$

$\Psi(\omega)$ es la transformada de Fourier de la *mother wavelet* $\psi(t)$. Esta ecuación también se llama "condición de admisibilidad".

Para el propósito particular de este trabajo, se probaron todos los tipos de *mother wavelets* que se pueden implementar con MATLAB[®] (alrededor de 90), y se descubrió que la *mother wavelet* del sombrero mexicano (*Mexican hat*) era la más útil debido a sus propiedades satisfactorias. La función de este tipo de *mother wavelet* es:

$$\psi(t) = \frac{2}{\pi^{1/4} \sqrt{3}\sigma} \left(\frac{t^2}{\sigma^2} - 1 \right) \exp \left(-\frac{t^2}{2\sigma^2} \right). \quad (10)$$

La forma complicada se deriva de la segunda derivada de una función gaussiana, $\exp \left(-\frac{t^2}{2\sigma^2} \right)$.

El apodo de "sombrero mexicano" se debe a que la forma de la función es como un típico sombrero mexicano. Debido al rápido decaimiento de la función gaussiana, esta función cae a cero muy rápido. Se puede esperar que sea limitada en tiempo en un cierto rango, por ejemplo [-5, 5]. Esto cumple con la propiedad de las *mother wavelets* (figura 2.4).

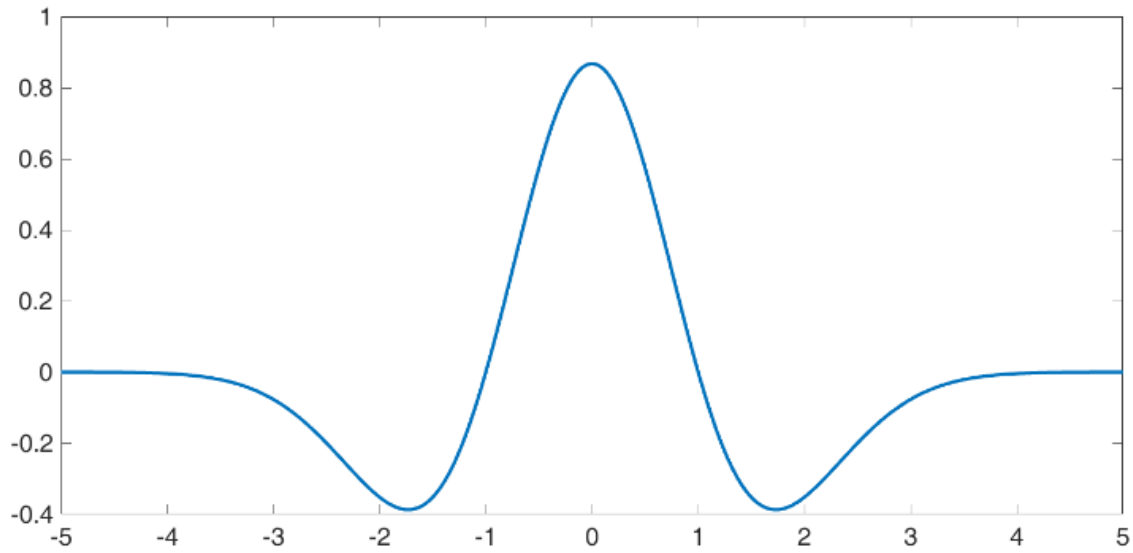


Figura 2.4. Onda madre de sombrero mexicano (*Mexican hat mother wavelet*).

La transformada de Fourier correspondiente de esta función de *mother wavelet* es:

$$\Psi(\omega) = \frac{-\sqrt{8}\sigma^{5/2}\pi^{1/4}}{\sqrt{3}}\omega^2\exp\left(-\frac{\sigma^2\omega^2}{2}\right). \quad (11)$$

3 Descripción del modelo numérico

Para el desarrollo numérico de esta investigación, se escribió un código MEF llamado "BRITRANSYS" en ANSYS® (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® se construyó de la siguiente manera: la geometría del modelo del PRP se creó en AutoCAD®, luego se convirtió en comandos APDL® a través de una hoja Excel® 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® simples, principalmente "** DO".

Se utilizaron tres tipos diferentes de elementos para construir el modelo (figura 3.1): 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 (figura 3.1a) 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 (figura 3.1b) 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 (figura 3.1c) 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.

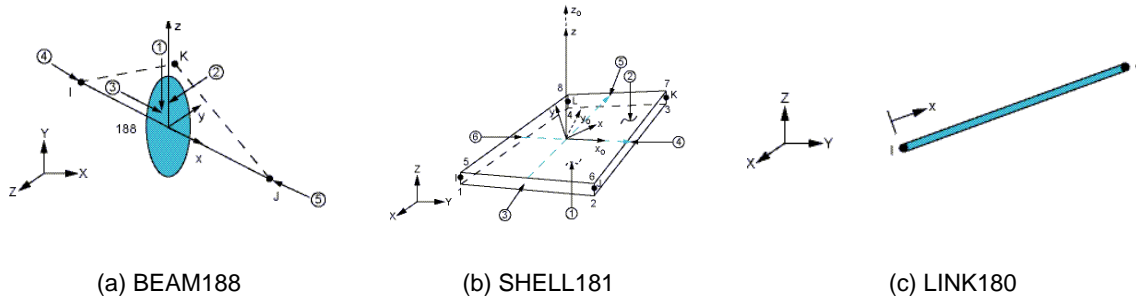


Figura 3.1. Elementos ANSYS® utilizados para el modelo MEF.

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 3.2 muestra el modelo MEF sin daño y sus primeras cinco formas modales con las frecuencias naturales correspondientes. Cabe destacar que esos dos parámetros no cambian lo suficiente debido al daño y, por tanto, no pueden considerarse como indicadores que adviertan sobre la presencia de algún defecto. Por eso, se puede implementar un método como el que se propone en este trabajo. Este modelo MEF se calibró con resultados experimentales obtenidos del monitoreo del PRP.

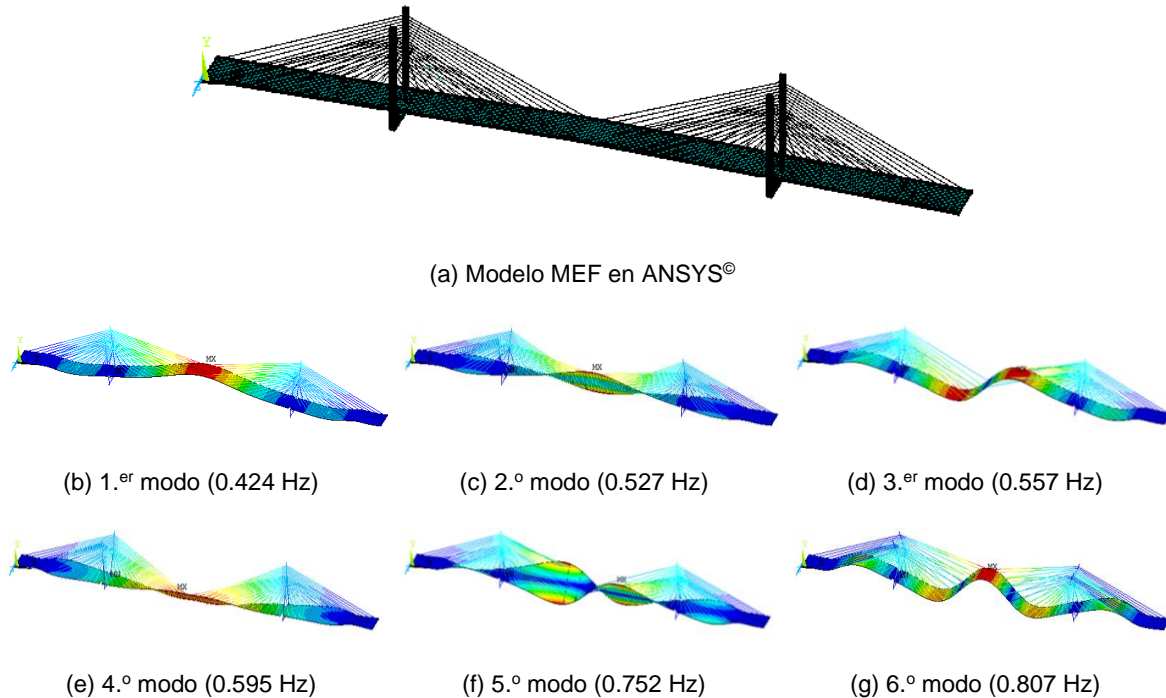


Figura 3.2. Modelo MEF en ANSYS® y sus primeras seis formas modales principales/frecuencias.

Por otro lado, se desarrolló un código en MATLAB® (R2017a) llamado "MAT_BRITRANSYS" para posprocesar las señales del modelo MEF, y seguir la metodología para la detección de daño (MAEW o método de acumulación de energía *wavelet*). Este código carga dos simulaciones numéricas del código ANSYS® (una sana y una dañada en formato ".txt") para diferentes posiciones de medición a lo largo de la sección considerada del tablero (las mismas posiciones de medición para casos sanos y dañados), y proporciona: diagramas en el dominio del tiempo (*waveforms*), diagramas en el dominio de la frecuencia (FFT), espectrogramas y diagramas CWT de colores en 3-D; todo para señales originales, ruidosas (ruido gaussiano agregado) y filtradas (filtro Savitzky-Golay usado). Además, este código también posprocesa los diagramas CWT y realiza restas (señales dañadas - señales sanas); elimina los efectos de borde (mediante extensiones de señales) para llevar los efectos de borde a partes "inexistentes" del tablero considerado del puente; calcula la EW total para cada punto de medición de todo el respectivo tablero del puente, y hace un promedio de la EW total considerando las diferentes posiciones de medición. Posteriormente, se puede detectar un daño y se puede identificar su ubicación mediante la acumulación de esta energía. Para analizar los datos reales del PRP, se utilizó el mismo código con algunas modificaciones de acuerdo con la cantidad, posición y tipo de sensores.

4 Resultados de las simulaciones numéricas y descripción del MAEW

Dos de las fallas más peligrosas que pueden conducir al colapso del PRP (como en cualquier puente atirantado) son un daño en el tablero y un tirante dañado. Ambos casos se estudian en esta sección considerando el modelo MEF y obteniendo resultados enfocados en la creación del MAEW como se describirá en la última parte de esta sección.

Para comenzar con el análisis, se implementaron todos los tipos de *mother wavelets* que se pueden seleccionar con MATLAB®, así como diferentes tipos de filtros; los mejores resultados para identificar daño se obtuvieron con la *mother wavelet* del sombrero mexicano y un filtro Savitzky-Golay.

El primer caso estudiado fue un daño de nivel intermedio en el tablero, simulado al reducir un 30% el área de la sección transversal ($0.30h$, donde h es la altura del tablero) en el 5% del puente de 203 m de longitud (tablero del puente entre torres). El daño se ubicó en el 25%, 50% y 75% de la longitud considerada del tablero del puente (uno a la vez), y los puntos de medición se establecieron al 25%, 50% y 75% de la longitud considerada del tablero del puente (todos al mismo tiempo para cada caso de puente sano y puente con un solo daño).

Como se ha notificado [1, 15], vehículos a bajas velocidades permiten la identificación de daño con mayor precisión en puentes largos. Sin embargo, la selección de un vehículo con baja velocidad cruzando todo el PRP impactaría significativamente en el tiempo de cómputo. Por lo tanto, a fin de reducir el tiempo de procesamiento, se seleccionó una fuerza móvil representando un vehículo tipo T3S3 (nomenclatura no relacionada con la correspondiente de tirantes y semiarpas) completamente cargado (54,000 kgf) para cruzar sólo el tablero del puente entre torres; es decir, $L = 203$ m (en vez de 407.21 m) con una velocidad de 1 m/s y una frecuencia de muestreo de 64 Hz. Esta configuración y la selección de una resolución adecuada para los diagramas CWT, de acuerdo con el rango de escala, permitieron tener un equilibrio entre el tiempo de cómputo y la precisión de los resultados para la identificación de daño.

El carril seleccionado para la fuerza en movimiento fue el carril derecho del lado aguas abajo y los puntos de medición se ubicaron en los nodos correspondientes del lado derecho del tablero (lado aguas abajo) donde la fuerza móvil no pasa.

En las figuras 4.1 y 4.2 se muestran los espectrogramas típicos (usando la STFT) para puente sano y puente con tablero dañado al 25% de L , respectivamente, los cuales se obtuvieron de las señales de aceleración correspondientes en las tres

ubicaciones. A pesar de que estos diagramas son numéricos y no se agregó ruido, encontrar indicios claros para detectar daño es muy difícil debido a las limitaciones de la STFT explicadas anteriormente.

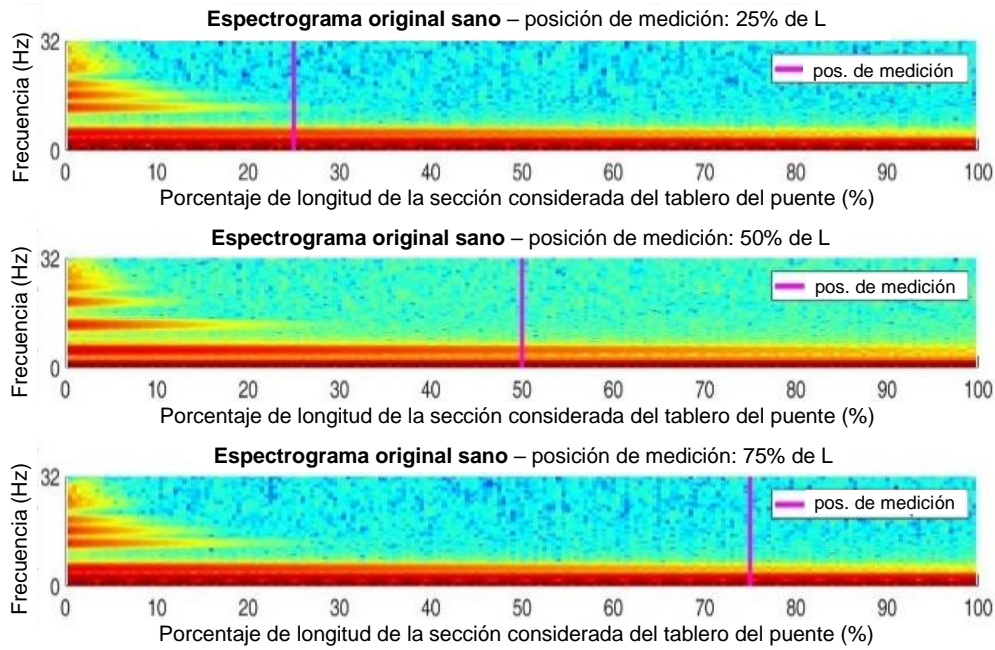


Figura 4.1. Espectrogramas a partir de las señales de aceleración para puente sano.

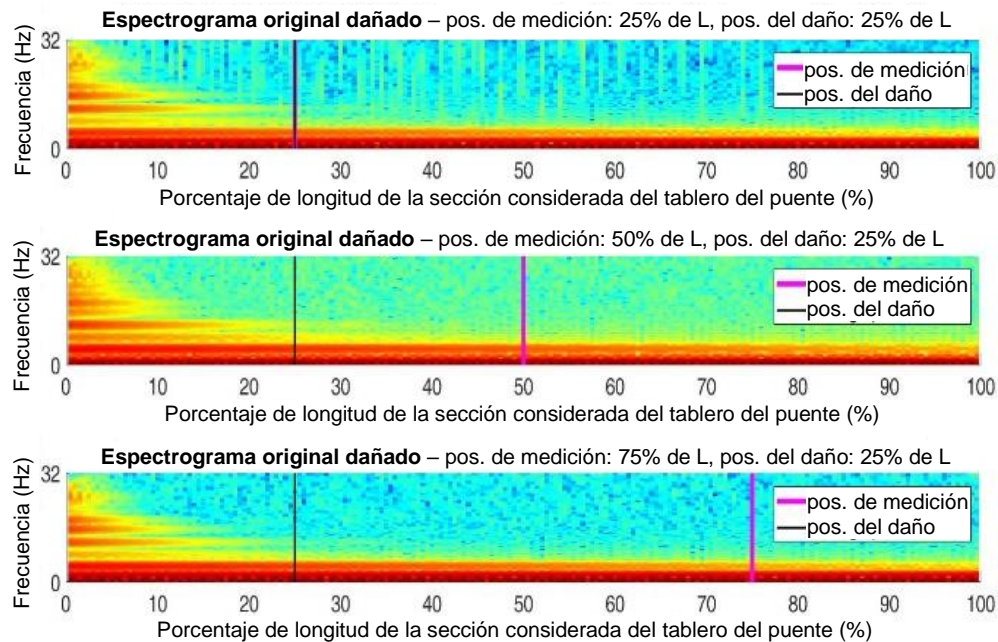


Figura 4.2. Espectrogramas a partir de las señales de aceleración para puente con tablero dañado a 0.25L.

Por otro lado, las mismas señales utilizadas para los diagramas de la figura 4.1 y 4.2 se posprocesaron con el fin de obtener los correspondientes diagramas CWT para el puente sano y puente dañado al 25% de L en las tres posiciones de medición (figuras 4.3 y 4.4, respectivamente). Como se puede observar, para este amplio rango inicial de escala (de 1 a 500) existe un pequeño indicio de daño alrededor de 0.25L, pero no es muy evidente porque está parcialmente enmascarado. En este rango de escala, la EW se amplifica principalmente en la zona de influencia de la primera frecuencia natural y, en segundo lugar, en las regiones de los efectos de borde (alrededor del 0% y 100% de L) y del daño mismo (alrededor del 25% de L), impidiendo una clara identificación del daño. Por lo tanto, comparando los diagramas dañados (figura 4.4) con los correspondientes del caso sano (figura 4.3) podrían parecer muy similares entre sí; sin embargo, el daño está presente, pero enmascarado.

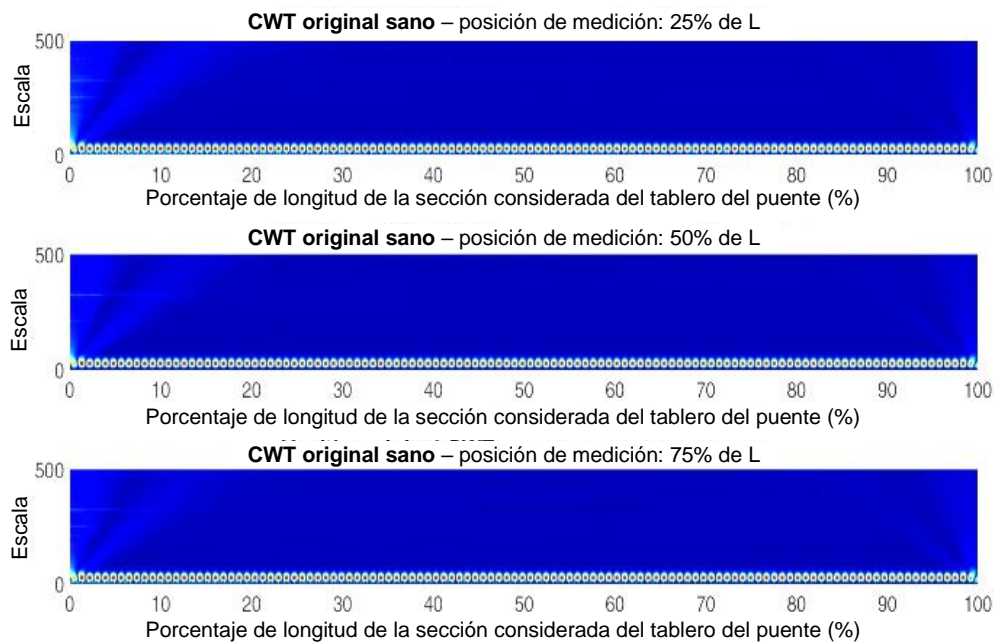


Figura 4.3. Diagramas CWT a partir de las señales de aceleración originales para el caso de puente sano. Tres diferentes posiciones de medición (de arriba a abajo: 0.25L, 0.50L y 0.75L).

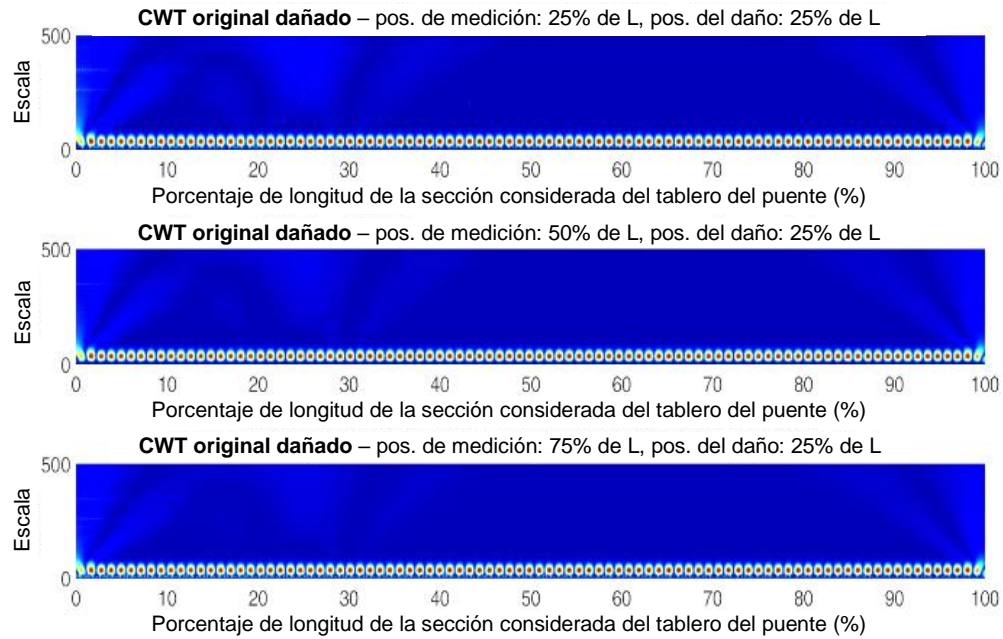


Figura 4.4. Diagramas CWT a partir de las señales de aceleración originales para el caso de tablero del puente dañado a 0.25L. Tres diferentes posiciones de medición (de arriba a abajo: 0.25L, 0.50L y 0.75L).

A efecto de aumentar la evidencia de daño, las señales utilizadas para obtener los diagramas mostrados en las figuras 4.3 y 4.4 se restaron (dañadas - sanas) y luego las señales resultantes se extendieron utilizando el comando de MATLAB® "wextend" para eliminar los efectos de borde. En la figura 4.5 se muestra el diagrama CWT restado y extendido sólo para una medición por fines de brevedad. Se puede observar que los efectos de borde se sacaron de la longitud real considerada del puente, mientras que el efecto útil de la resta aún no se puede distinguir claramente porque el rango de escala no es conveniente. Por lo tanto, sólo se debe considerar la zona dentro del rectángulo amarillo; de esta manera, se analiza nuevamente la longitud real del puente (pero ahora sin efectos de borde), mientras que la escala de 250 a 500 permite enfocarse en el efecto del daño y se apreciará la influencia de la resta.

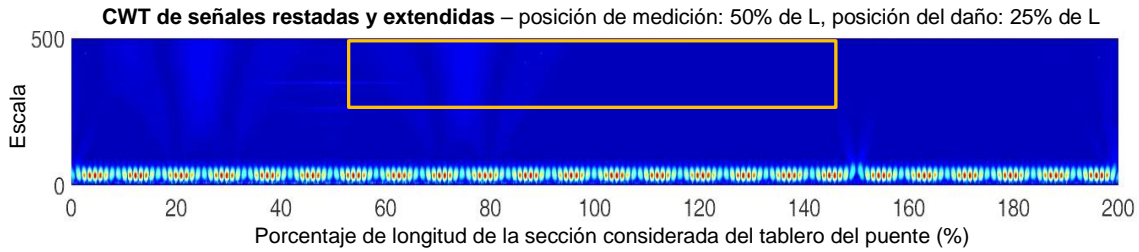


Figura 4.5. Diagrama CWT a partir de la resta y extensión de las señales de aceleración para la posición de medición a 0.50L y posición del daño a 0.25L, mostrando con un rectángulo amarillo la región importante para calcular la EW.

Así, los diagramas CWT para las tres posiciones de medición considerando la región del rectángulo amarillo se muestran en la figura 4.7, mientras que los respectivos diagramas para el puente sano se muestran en la figura 4.6. Al comparar esas figuras, la presencia del daño es clara, con indicadores evidentes de altos coeficientes *wavelets* (energía) alrededor de la ubicación del daño. 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 de la posición del daño, mayor será la energía, como se mostrará a continuación.

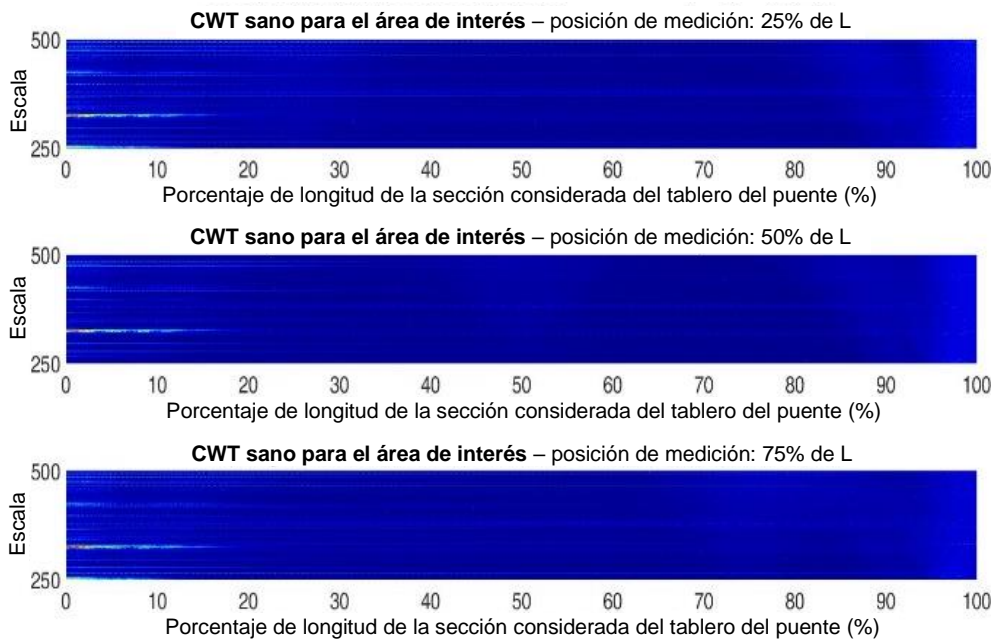


Figura 4.6. Diagramas CWT a partir de las señales de aceleración para el área de interés para el caso de puente sano. Tres diferentes posiciones de medición (de arriba a abajo: 0.25L, 0.50L y 0.75L).

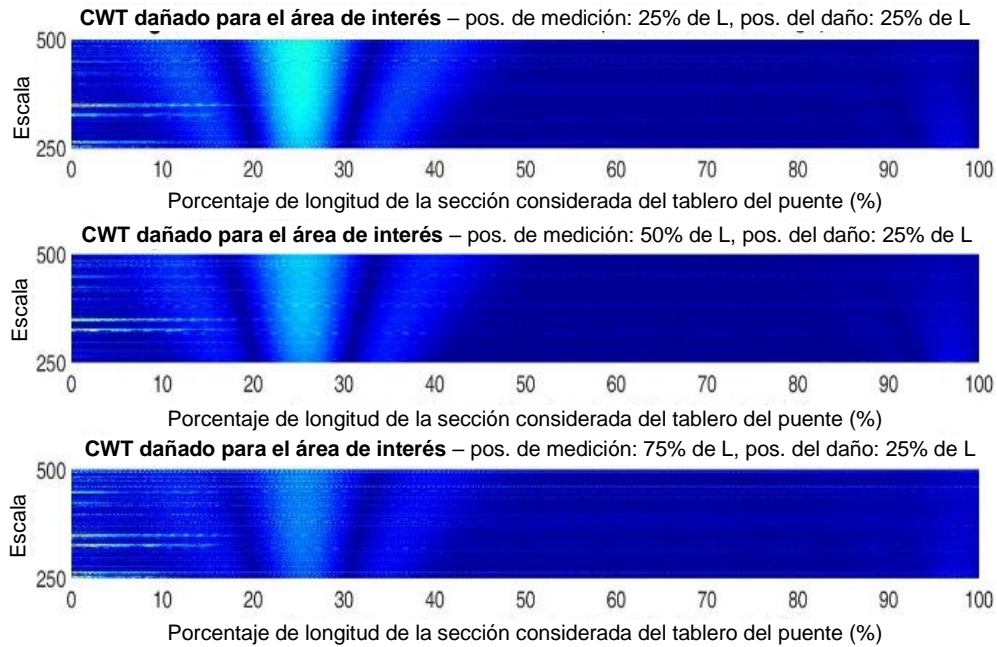


Figura 4.7. Diagramas CWT a partir de las señales de aceleración para el área de interés para el caso de tablero del puente dañado a 0.25L. Tres diferentes posiciones de medición (de arriba a abajo: 0.25L, 0.50L y 0.75L).

La EW para el tablero del puente sano y dañado se calculó para cada punto de la longitud considerada mediante el área bajo la curva a lo largo del rango de escala ajustado. Los resultados para los casos sanos y dañados se muestran en las figuras 4.8 y 4.9, respectivamente, donde se puede observar que la EW para los casos sanos es muy baja y plana, con una pequeña acumulación de EW en los puntos de medición y en los extremos debido a los efectos de borde remanentes, mientras que, para los casos dañados, sin importar el punto de medición, la acumulación de EW siempre está alrededor de la ubicación del daño y su magnitud es mucho mayor en comparación con los casos sanos. Incluso para el caso de medición a 0.75L, el porcentaje de error para la localización del daño es muy aceptable (4.1%), mientras que para las otras dos mediciones es menor debido a la cercanía con el daño (2.8% y 1.6% para la medición a 0.50L y 0.25L, respectivamente). La ventaja de este método de detección de daño utilizando sólo un punto de medición lejos del daño es interesante.

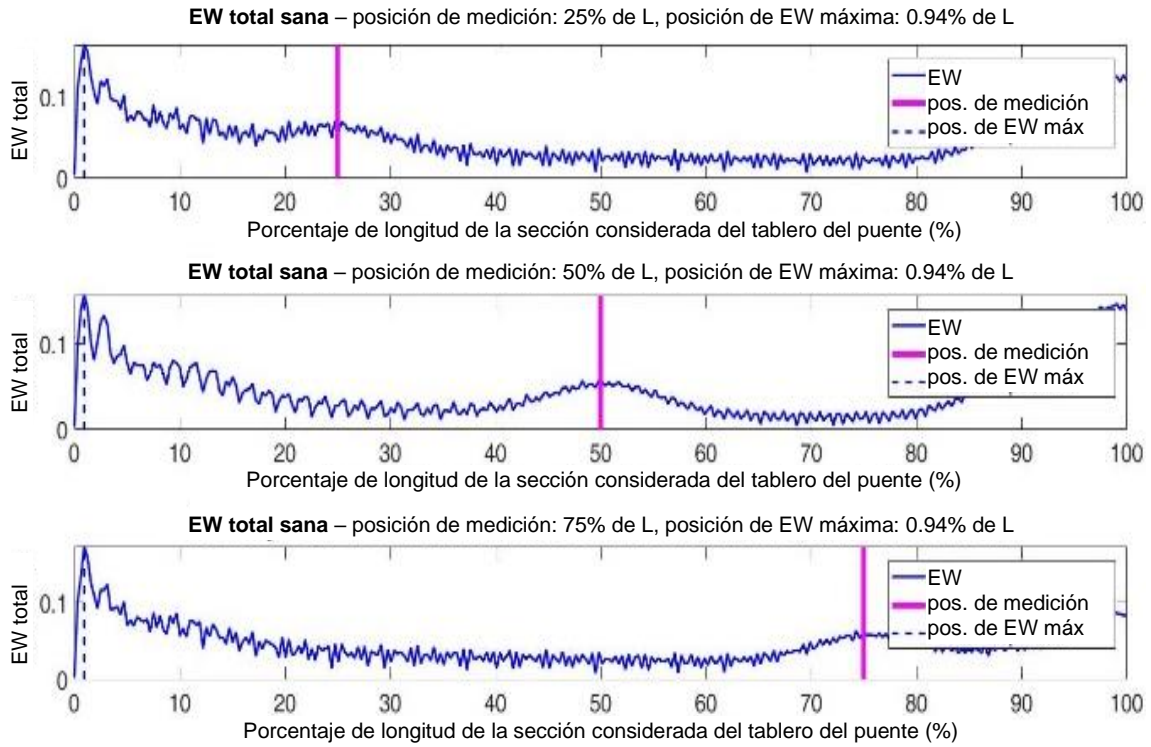


Figura 4.8. EW total a partir de las señales de aceleración para el caso de puente sano. Tres diferentes posiciones de medición (de arriba a abajo: 0.25L, 0.50L y 0.75L).

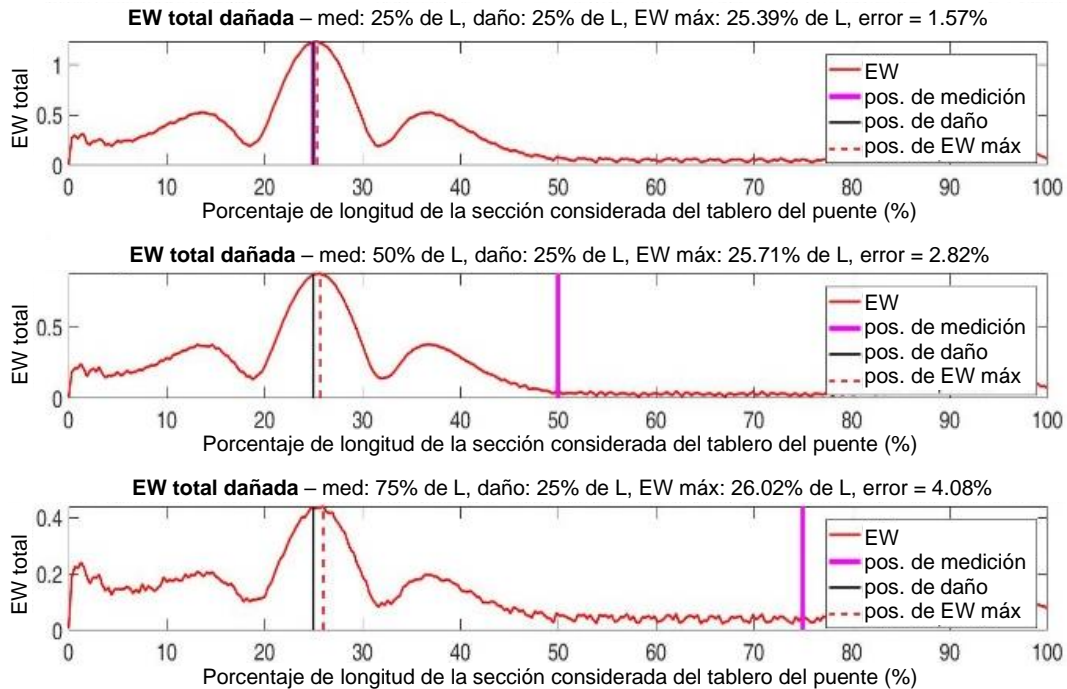


Figura 4.9. EW total a partir de las señales de aceleración para el caso de tablero del puente dañado a 0.25L. Tres diferentes posiciones de medición (de arriba a abajo: 0.25L, 0.50L y 0.75L).

En casos reales, sólo un valor de la EW total sería útil y, por lo tanto, se debe calcular el promedio de la EW considerando todos los puntos de medición. Además, se debe tener en cuenta que las señales contendrían porcentajes significativos de ruido, lo que dificultaría la identificación de daño y se requeriría un filtro útil. Por lo tanto, en las figuras 4.10 y 4.11 se presenta la EW total para todas las posiciones de medición y los promedios respectivos para casos sanos y dañados respectivamente, considerando las señales originales, ruidosas y filtradas. Las señales originales son aquellas generadas con las simulaciones MEF sin que se haya agregado ruido ni utilizado filtros (como las señales empleadas para los diagramas mostrados anteriormente); para las señales ruidosas, se agregó 15% de ruido gaussiano, y para las señales filtradas se implementó un filtro Savitzky-Golay (orden: 2; longitud de ventana: 19) para las señales ruidosas. Se puede observar en las figuras 4.10 y 4.11 que el porcentaje de error en la identificación de daño para la señal ruidosa promedio aumentó 2.6 veces en comparación con el caso original (lo cual es aún aceptable considerando el gran porcentaje de ruido agregado), mientras que, para el caso filtrado, el porcentaje de error se redujo 1.4 veces en comparación con el caso ruidoso. En todos los escenarios, la detección y localización de daño fue posible y el porcentaje de error fue inferior al 5.0%.

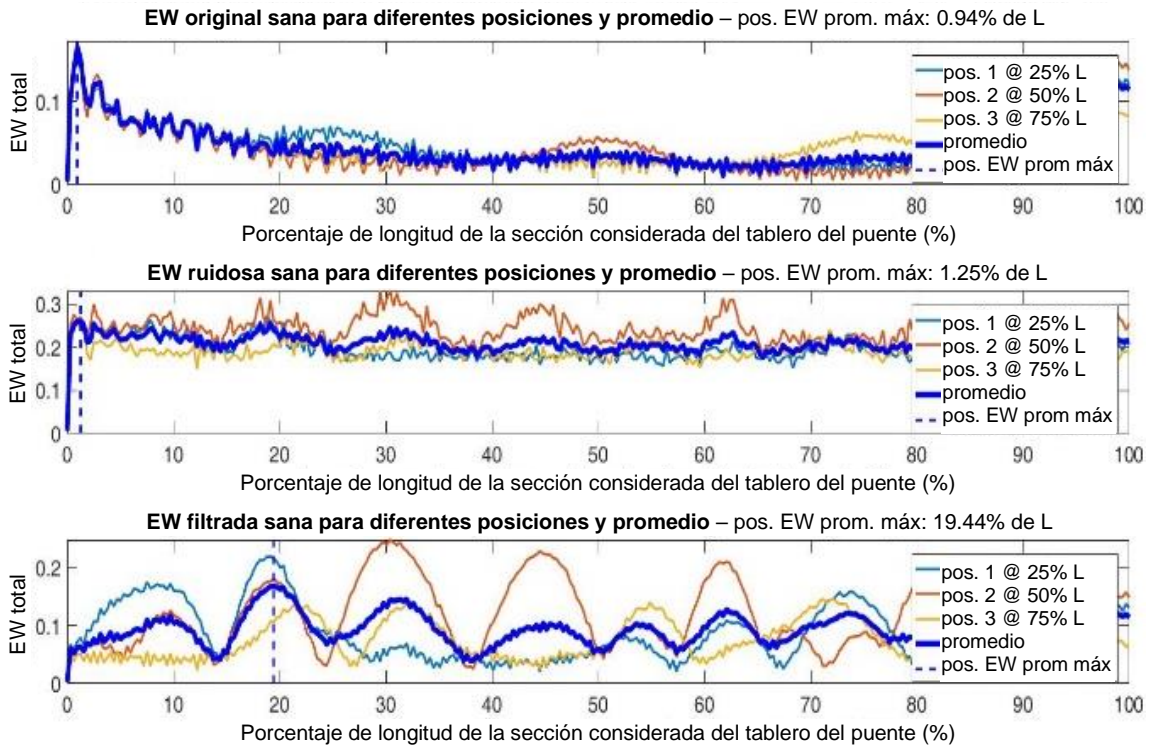


Figura 4.10. EW total a partir de las señales de aceleración para diferentes posiciones de medición y promedio respectivo para el caso de puente sano. Tres diferentes condiciones de las señales (de arriba a abajo: original, ruidosa y filtrada).

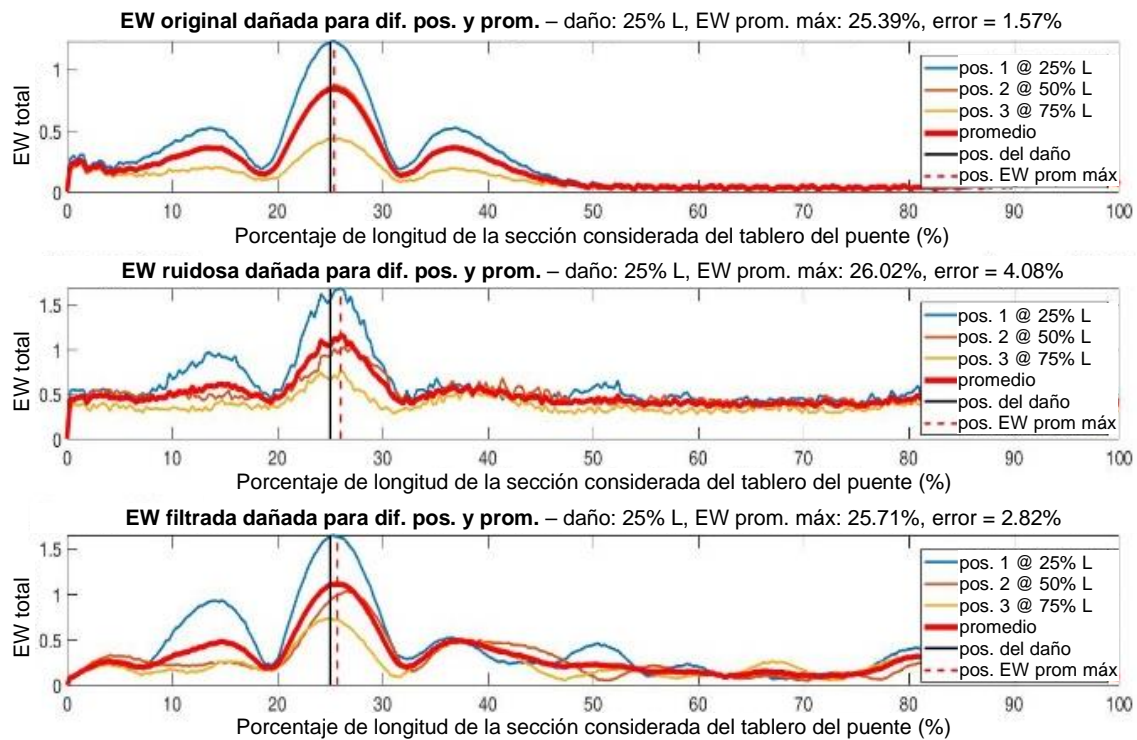


Figura 4.11. EW total a partir de las señales de aceleración para diferentes posiciones de medición y promedio respectivo para el caso de tablero del puente dañado a 0.25L. Tres diferentes condiciones de las señales (de arriba a abajo: original, ruidosa y filtrada).

Por último, para una fácil visualización, en la figura 4.12 se muestra sólo la EW promedio para puente sano y dañado y para los tres escenarios de señales (original, ruidosa y filtrada), con el respectivo porcentaje de error en la localización del daño.

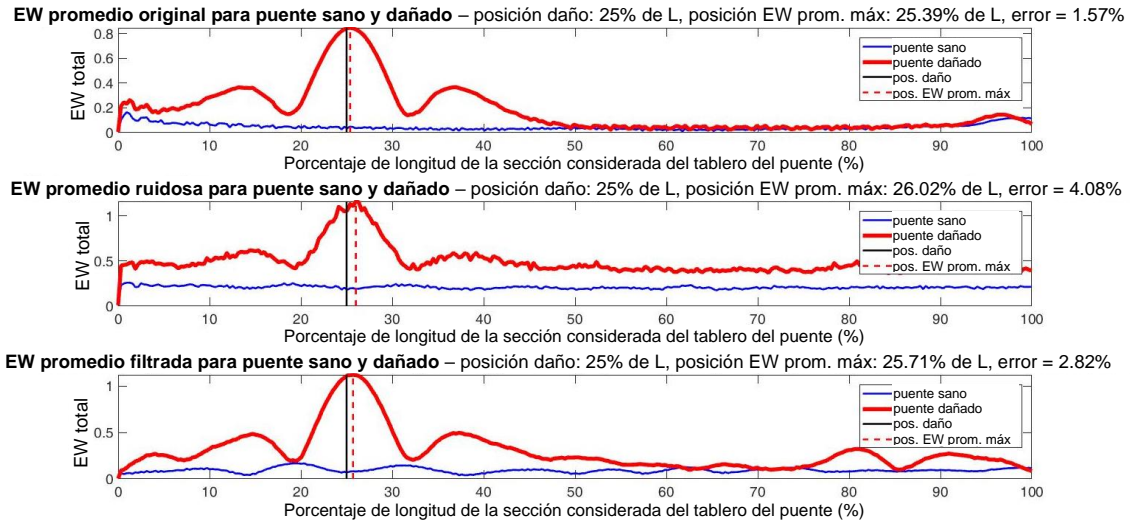


Figura 4.12. EW total promedio a partir de las señales de aceleración para puente sano y tablero del puente dañado a 0.25L. Tres diferentes condiciones de las señales (de arriba a abajo: original, ruidosa y filtrada).

Asimismo, la ubicación del daño se cambió y se colocó a la mitad entre torres (0.50L) y a 0.75L. Los diagramas CWT ruidosos y filtrados para el área de interés se muestran en la figura 4.13 para daño a 0.50L y en la figura 4.14 para daño a 0.75L, mientras que la EW total promedio de las señales originales, ruidosas y filtradas se muestra en la figura 4.15 para un puente sano y dañado a 0.50L, y en la figura 4.16 para un puente sano y dañado a 0.75L.

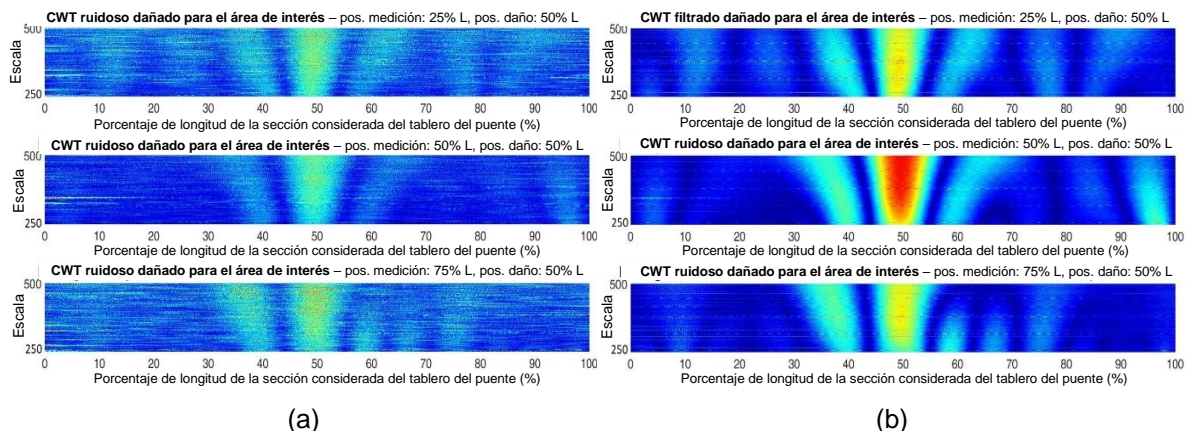


Figura 4.13. Diagramas CWT a partir de las señales de aceleración para el área de interés para tablero del puente dañado a 0.50L y diferentes condiciones de las señales: (a) ruidosas y (b) filtradas. Tres diferentes posiciones de medición para cada caso (de arriba a abajo: 0.25L, 0.50L y 0.75L).

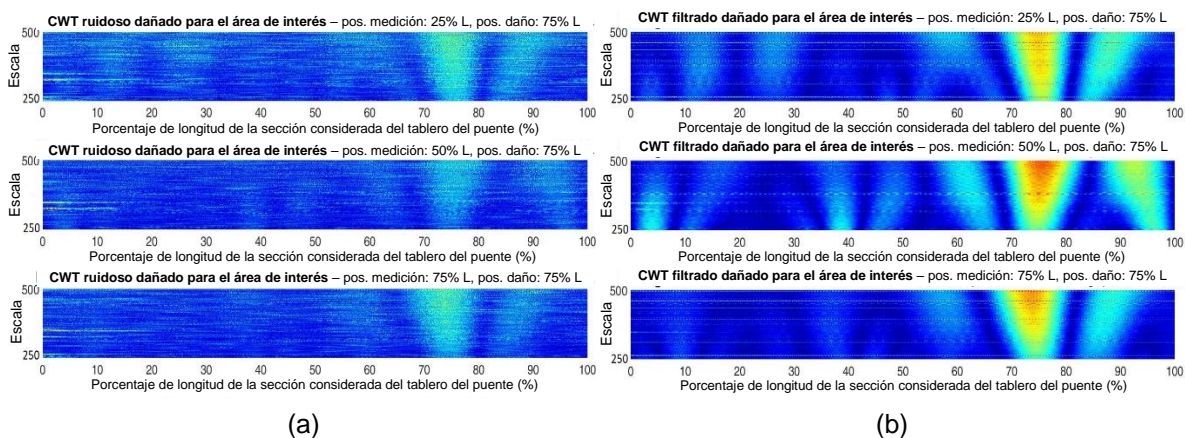


Figura 4.14. Diagramas CWT a partir de las señales de aceleración para el área de interés para tablero del puente dañado a 0.75L y diferentes condiciones de las señales: (a) ruidosas y (b) filtradas. Tres diferentes posiciones de medición para cada caso (de arriba a abajo: 0.25L, 0.50L y 0.75L).

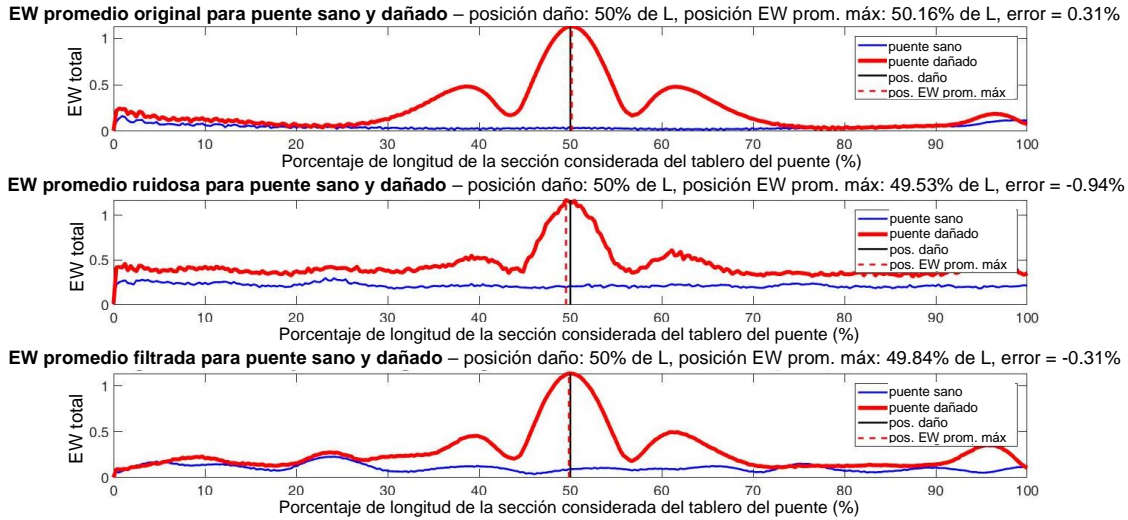


Figura 4.15. EW total promedio a partir de las señales de aceleración para puente sano y tablero del puente dañado a 0.50L. Tres diferentes condiciones de las señales (de arriba a abajo: original, ruidosa y filtrada).

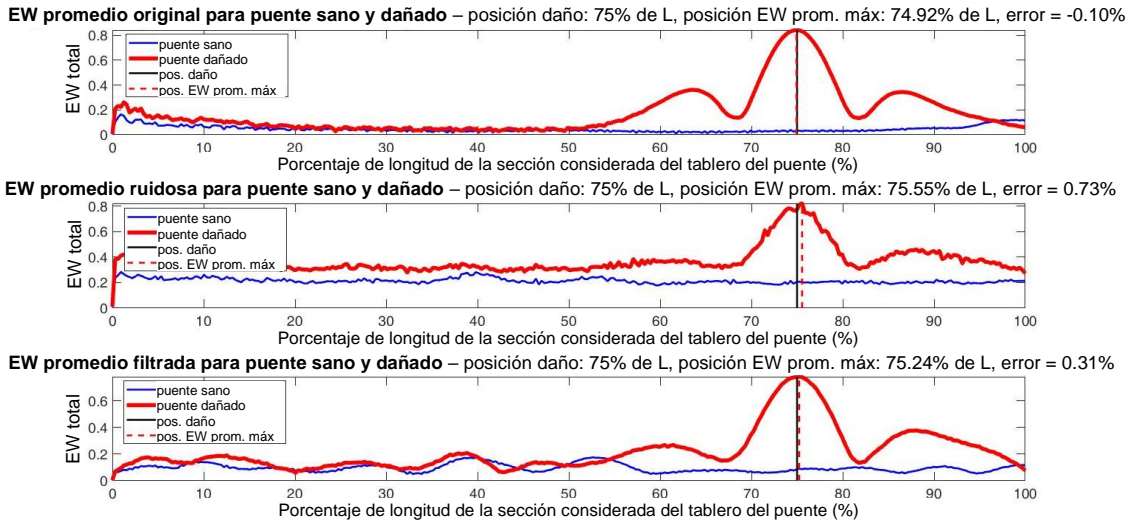


Figura 4.16. EW total promedio a partir de las señales de aceleración para puente sano y tablero del puente dañado a 0.75L. Tres diferentes condiciones de las señales (de arriba a abajo: original, ruidosa y filtrada).

Los diagramas CWT que se muestran en las figuras 4.13 y 4.14 son contundentes para la identificación de daño a 0.50L y 0.75L, respectivamente. Al usar las señales ruidosas, la identificación de daño es evidente debido al cambio de color que representa a los coeficientes *wavelets* más altos, mientras que, al usar las señales filtradas, los diagramas CWT son más claros y la identificación de daño es aún más fácil.

En cuanto a la EW total promedio, esa EW es alta para ambos casos de tablero dañado (0.50L y 0.75L) y baja para los correspondientes casos sanos (figuras 4.15 y 4.16). Además, la EW para las señales dañadas se acumula en las proximidades de la posición del daño y, de este modo, las diferencias entre las posiciones de los valores máximos de la EW promedio y las posiciones respectivas de daño son muy pequeñas, mientras que para los casos sanos no hay acumulaciones de energía notables.

Tomando en cuenta el caso de daño al 50% de L (figura 4.15), el porcentaje de error para la identificación de daño al considerar el valor máximo de la acumulación de la EW fue del 0.31% para la señal original, luego aumentó tres veces para la señal ruidosa y finalmente regresó al mismo valor absoluto original para la señal filtrada (0.31%). Para la señal original, el daño se identificó ligeramente a la derecha de la posición real, mientras que, para las señales ruidosas y filtradas, el daño se identificó ligeramente a la izquierda de la posición real.

Por otro lado, considerando el daño al 75% de L (figura 4.16), 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. Para la señal original, el daño se identificó ligeramente a la izquierda de la posición real, mientras que, para las señales ruidosas y filtradas, se identificó ligeramente a la derecha de la posición real.

Así, usando las señales de aceleración y siguiendo los pasos secuenciales para consolidar el MAEW, se logró detectar daño y se localizó con alta precisión, sin importar su posición en el tablero del puente, la condición de las señales (originales, ruidosas o filtradas), la cantidad de puntos de medición (único o promedio de puntos múltiples) ni la ubicación de los puntos de medición (en el daño, cerca o lejos de él). Es importante mencionar que una vez que se determina el área de interés en los diagramas CWT, la identificación de daño se vuelve fácil en los mismos diagramas CWT y los diagramas de EW total promedio confirmarán la existencia y ubicación del daño; además, esos diagramas EW ayudan a proporcionar un valor de la EW máxima para cuantificar la severidad del daño.

El mismo caso de daño analizado anteriormente mediante el uso de las señales de aceleración se estudia ahora, pero con las correspondientes señales de desplazamiento a partir de la vibración del puente. En la figura 4.17, se muestran los diagramas CWT usando las señales originales de desplazamiento en tres posiciones diferentes para tablero sano y dañado al 25% de L. Se utilizó un rango de escala inicial enorme (de 1 a 10,000) para explorar un indicio de daño y, de nuevo, no se encontraron evidencias claras de un vistazo.

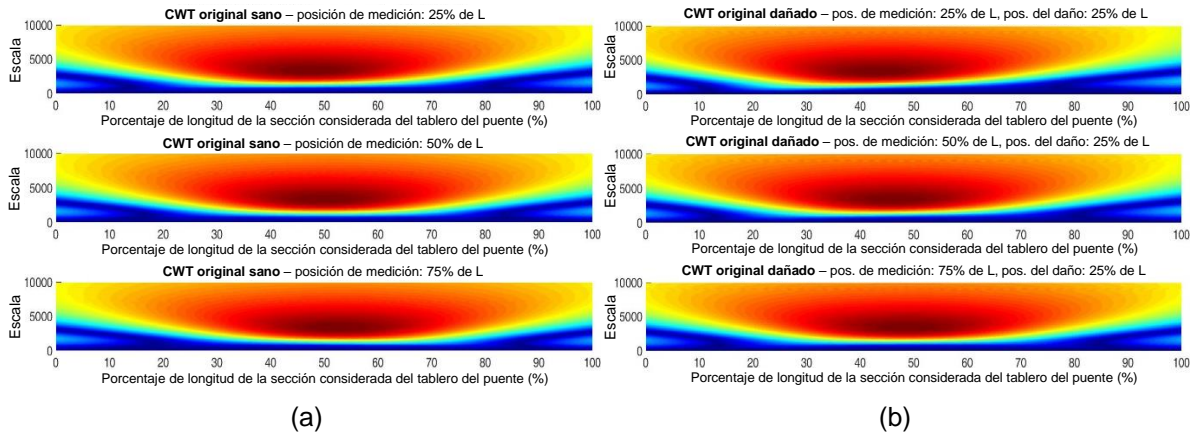


Figura 4.17. Diagramas CWT a partir de las señales de desplazamiento originales: (a) puente sano y (b) tablero del puente dañado a 0.25L. Tres diferentes posiciones de medición para cada caso (de arriba a abajo: 0.25L, 0.50L y 0.75L).

Después de realizar las restas y extensiones de las señales, así como de usar el rango útil de escala (de 250 a 500), los diagramas anteriores ahora lucen diferentes (figura 4.18). En esa nueva figura, es posible observar que no hay efectos de borde para ningún diagrama. Además, la energía para los casos sanos (figura 4.18a) se acumula alrededor del punto de medición, como se esperaba, pero esa energía es baja, como se puede observar en la figura 4.19a.

Por otro lado, para el caso dañado, toda la energía se acumula alrededor de la ubicación del daño sin importar el punto de medición. Adicionalmente, fuera de la zona de daño, la energía es prácticamente nula, lo cual se logró mediante la resta de las señales. Por eso, la forma de la expansión de energía se ve casi idéntica para todos los casos de daño con diferentes posiciones de medición (figura 4.18b); no obstante, la energía es mayor conforme el punto de medición esté más cerca del daño, como se puede ver en la figura 4.19b.

Parte de la energía acumulada en la zona de daño se pierde durante la resta, pero la ventaja es que no se mostrará energía en la zona de la medición cuando el daño no esté allí y las gráficas se verán más claras; la desventaja de la pérdida de energía debido a la resta y a las mediciones lejanas, en cambio, se puede compensar con el promedio de la EW, como se muestra en la figura 4.20. En esa última figura, el valor máximo de la EW promedio para el caso dañado es tres veces el valor correspondiente del caso sano y el porcentaje de error es bajo (1.57%).

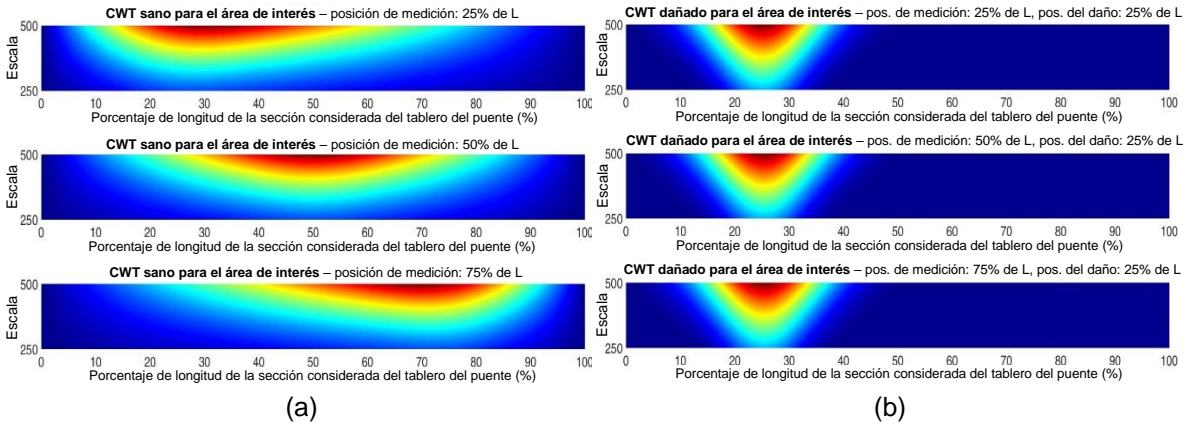


Figura 4.18. Diagramas CWT a partir de las señales de desplazamiento para el área de interés: (a) puente sano y (b) tablero del puente dañado a 0.25L. Tres diferentes posiciones de medición para cada caso (de arriba a abajo: 0.25L, 0.50L y 0.75L).

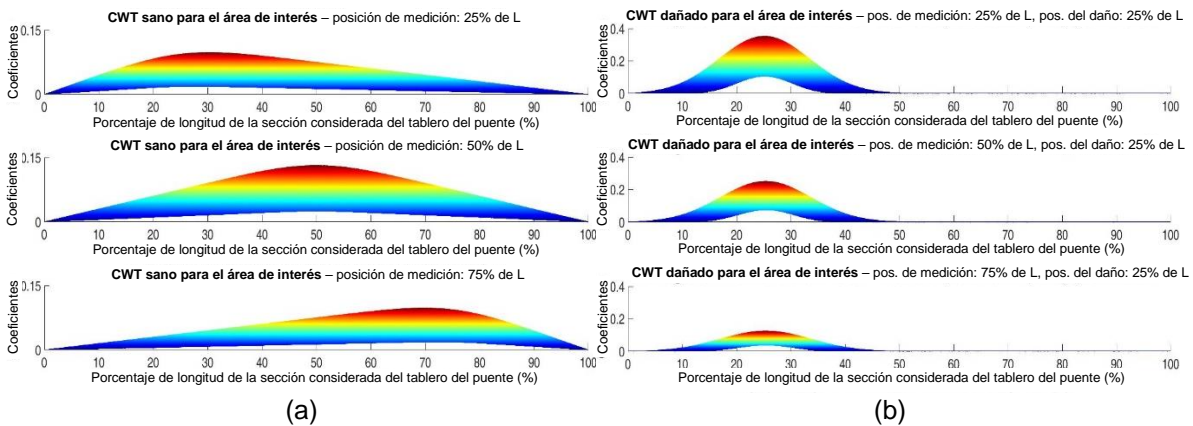


Figura 4.19. Diagramas CWT a partir de las señales de desplazamiento para el área de interés y mostrando los coeficientes en vez de la escala: (a) puente sano y (b) tablero del puente dañado a 0.25L. Tres diferentes posiciones de medición para cada caso (de arriba a abajo: 0.25L, 0.50L y 0.75L).

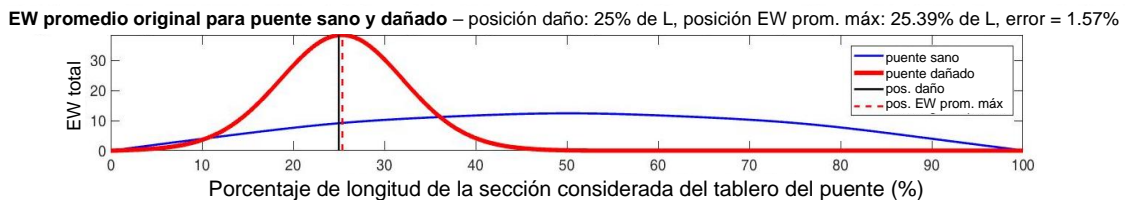


Figura 4.20. EW total promedio a partir de las señales de desplazamiento originales para puente sano y tablero del puente dañado a 0.25L.

Ahora, por fines de brevedad, sólo se usaron las señales de desplazamiento filtradas para calcular los diagramas CWT y diagramas EW total promedio, ya que éste es el escenario más realista con el cual se tiene que tratar; es decir, las señales siempre contendrán ruido y se debe usar un filtro para reducir ese ruido. Así, en la figura 4.21 se muestran los correspondientes diagramas CWT para el tablero sano y dañado a 0.25L, 0.50L y 0.75 a partir de las señales de desplazamiento filtradas. Asimismo, en la figura 4.22 se exhiben los respectivos diagramas de EW total promedio para los casos presentados en la figura 4.21.

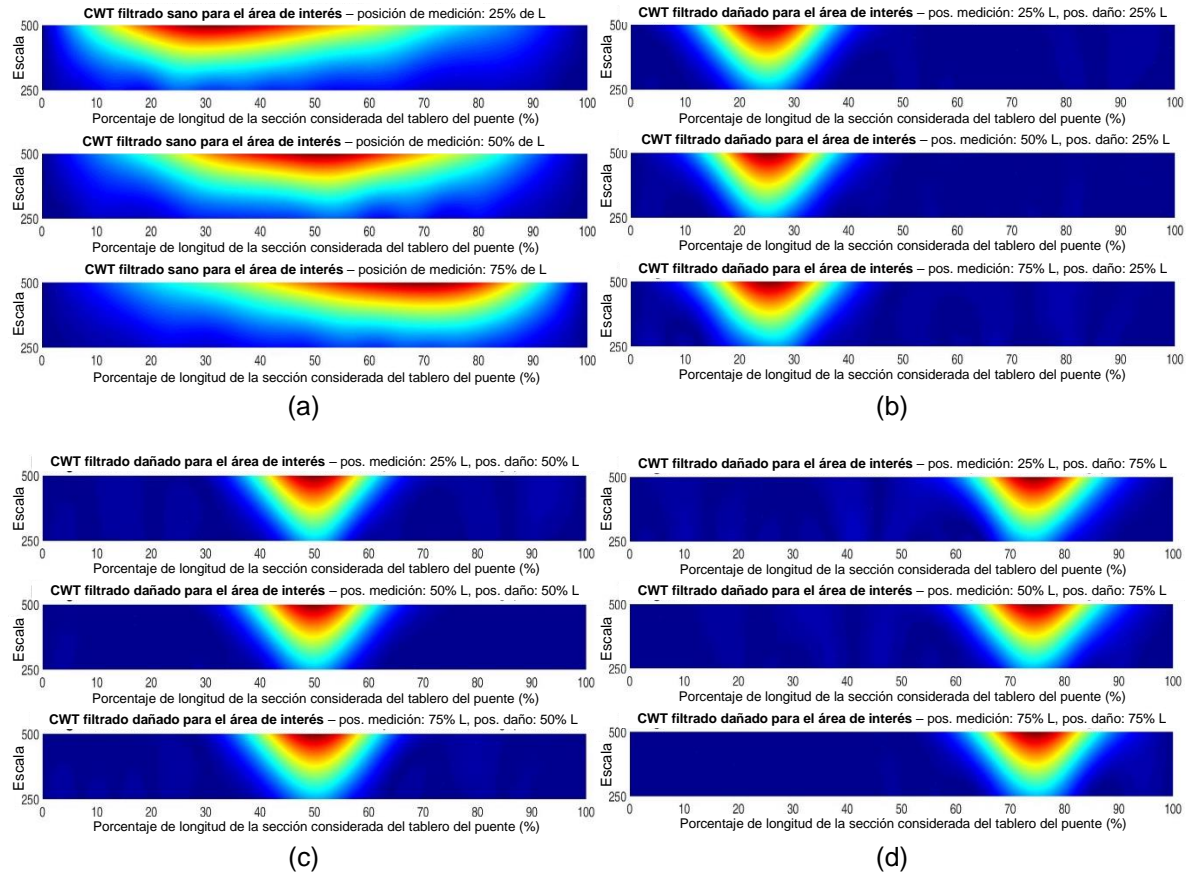


Figura 4.21. Diagramas CWT a partir de las señales de desplazamiento filtradas para el área de interés: (a) puente sano, (b) tablero del puente dañado a 0.25L, (c) tablero del puente dañado a 0.50L y (d) tablero del puente dañado a 0.75L. Tres diferentes posiciones de medición para cada caso (de arriba a abajo: 0.25L, 0.50L y 0.75L).

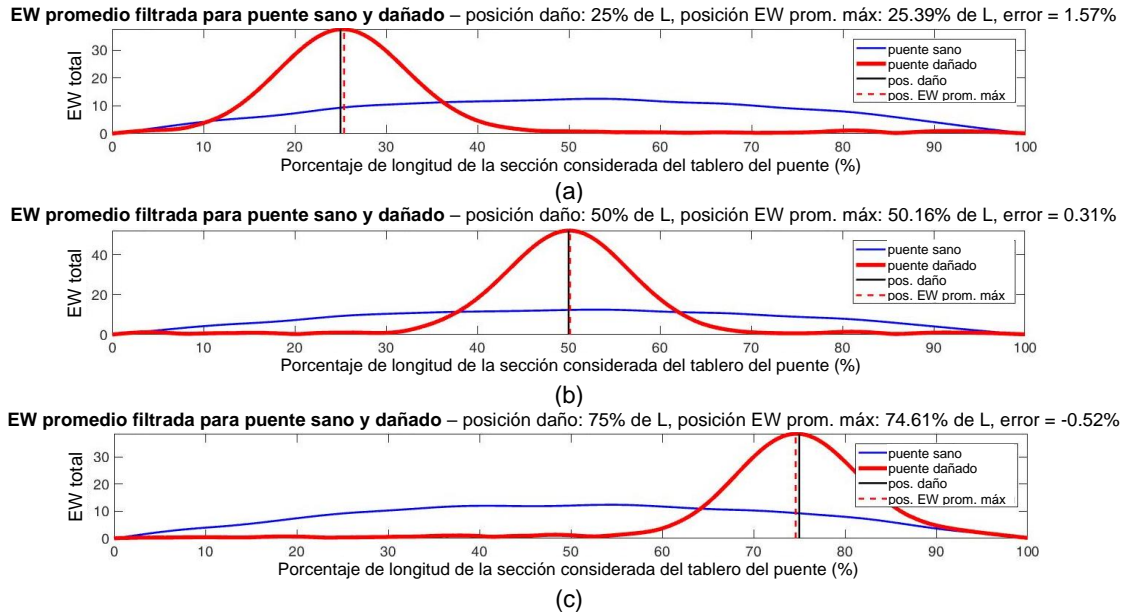
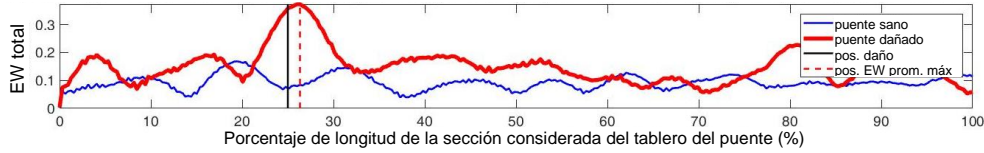


Figura 4.22. EW total promedio a partir de las señales de desplazamiento filtradas: (a) puente sano vs. tablero del puente dañado a 0.25L, (b) puente sano vs. tablero del puente dañado a 0.50L y (c) puente sano vs. tablero del puente dañado a 0.75L.

En la figura 4.21, se pudo realizar la detección y localización de daño de un vistazo con los diagramas CWT a partir de las señales de desplazamiento filtradas, mientras que en la figura 4.22 la diferencia de EW entre los casos sanos y dañados es evidente, por lo que se confirmó la existencia y ubicación de cada daño; además, el porcentaje de error nuevamente fue muy bajo (no más de 1.60%).

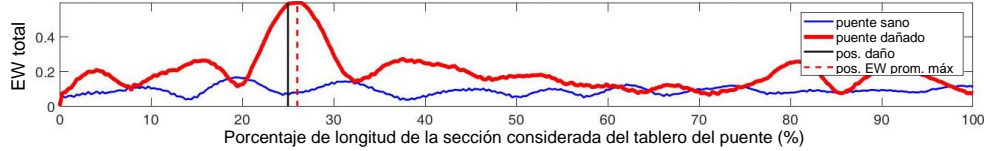
Para cuantificar la severidad del daño y la sensibilidad de este método, cuatro magnitudes diferentes de este tipo de daño en el tablero del puente, adicionales a la estudiada anteriormente, se simularon al 25% de L, para un total de cinco casos, es decir: 0.10h, 0.20h, 0.30h, 0.40h y 0.50h de reducción de altura. La EW total promedio para cada caso se muestra en la figura 4.23. Las señales utilizadas para esos gráficos fueron las señales de aceleración después de agregarles 15% de ruido y posteriormente filtrarlas, esto fue para analizar las señales más comunes disponibles en SHM real (aceleración) y su estado (ruidosas y luego filtradas). Las pequeñas diferencias de las EW sanas para los diferentes diagramas de la figura 4.23, aun cuando las señales sanas originales son obviamente las mismas, se deben a la aleatoriedad del ruido agregado. El código se configuró para analizar un caso sano y un caso dañado al mismo tiempo; en consecuencia, el caso sano se ejecutó para cada caso de daño y el ruido no era el mismo, por lo tanto, las EW filtradas no eran idénticas.

EW promedio filtrada para puente sano y dañado – posición daño: 25% de L, posición EW prom. máx: 26.33% de L, error = 5.33%



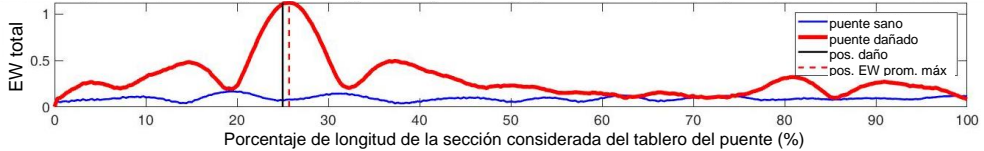
(a)

EW promedio filtrada para puente sano y dañado – posición daño: 25% de L, posición EW prom. máx: 26.02% de L, error = 4.08%



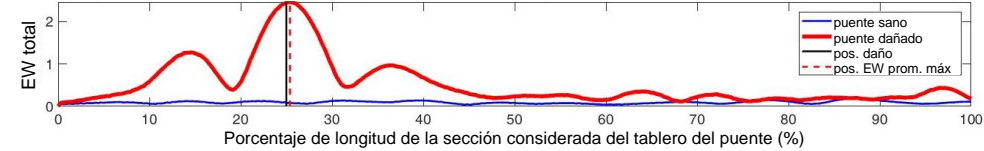
(b)

EW promedio filtrada para puente sano y dañado – posición daño: 25% de L, posición EW prom. máx: 25.71% de L, error = 2.82%



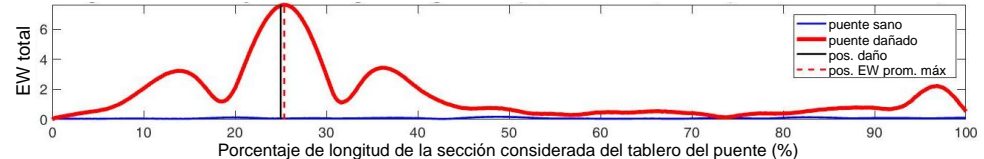
(c)

EW promedio filtrada para puente sano y dañado – posición daño: 25% de L, posición EW prom. máx: 25.39% de L, error = 1.57%



(d)

EW promedio filtrada para puente sano y dañado – posición daño: 25% de L, posición EW prom. máx: 25.33% de L, error = 1.32%



(e)

Figura 4.23. EW total promedio a partir de las señales de aceleración filtradas: (a) puente sano vs. tablero del puente dañado con reducción de 0.10h, (b) puente sano vs. tablero del puente dañado con reducción de 0.20h, (c) puente sano vs. tablero del puente dañado con reducción de 0.30h, (d) puente sano vs. tablero del puente dañado con reducción de 0.40h y (e) puente sano vs. tablero del puente dañado con reducción de 0.50h. Todos los casos de daño a 0.25L.

Adicionalmente, en la figura 4.24 es posible observar 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.

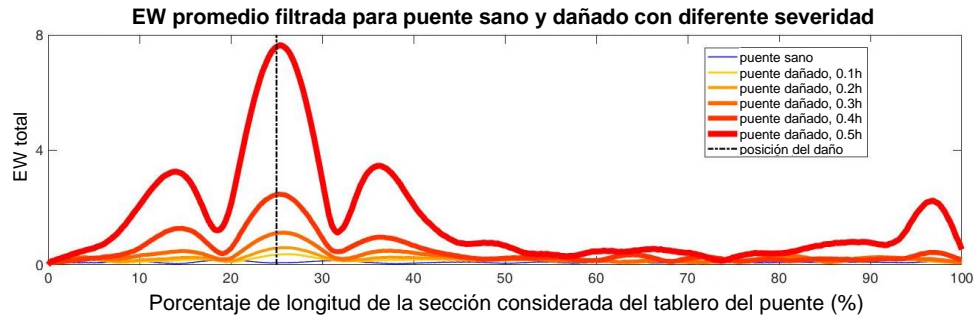


Figura 4.24. EW total promedio a partir de las señales de aceleración filtradas para puente sano y tablero del puente dañado a 0.25L con diferente severidad.

En la tabla 4.1, se presenta un resumen de los resultados mostrados en las figuras 4.23 y 4.24. En esa tabla, como se esperaba, es evidente la tendencia sobre el incremento de la EW dañada y la relación de “máxima EW promedio dañada / máxima EW promedio sana” a medida que aumenta la gravedad del daño, así como el incremento de la precisión en la localización del daño a medida que aumenta su magnitud. No obstante, el mayor porcentaje de error en los casos presentados en la tabla 4.1 (5.33%) sigue siendo muy aceptable considerando la baja magnitud del daño (0.10 h), el alto porcentaje de ruido (15%) y el tipo de señal utilizada (aceleración en lugar de desplazamiento).

Tabla 4.1. Análisis de severidad de daño para diferentes magnitudes de daño en el tablero del puente a 0.25L presentadas en las figuras 4.23 y 4.24.

Análisis de severidad de daño en el tablero del puente a 0.25L			
Magnitud de daño	Máxima EW promedio dañada	Máx. EW prom. dañada / Máx. EW prom. sana	Error en localización de daño (%)
0.10h	0.37	2.22	5.33
0.20h	0.60	3.55	4.08
0.30h	1.12	6.65	2.82
0.40h	2.46	13.32	1.57
0.50h	7.65	41.35	1.32

Finalmente, con respecto a la parte numérica de esta investigación, para el otro tipo de daño (tirante dañado) sólo se analizaron tres casos: puente sano, puente con tirante dañado T1S5 y puente con tirante dañado T10S7. Para todos esos casos, se tuvo que considerar la longitud total del puente (407.21 m) y nuevamente se establecieron tres puntos de medición, esta vez a 0.33L, 0.50L y 0.66L, en lugar de 0.25L, 0.50L y 0.75L; esto se debió a que el primer punto y el último se habrían ubicado prácticamente en las torres y no era conveniente; entonces, la mejor distribución para mantener sólo tres puntos de medición fue dos puntos en (1/3) L y (2/3) L y uno adicional a la mitad (1/2) L.

El caso del tirante dañado T1S5 corresponde con el caso real analizado en la siguiente sección, donde el tirante 1 de la semiarpa 5 colapsó y cuya falla se describió anteriormente. 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 semiarpa 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.

Dado que la actual longitud considerada del puente es el doble de la longitud anterior que se tomó en cuenta para analizar daños en el tablero, con el objetivo de reducir el tiempo de cómputo y evitar un bloqueo de cualquiera de los dos códigos utilizados con ANSYS® o MATLAB®, la frecuencia de muestreo se redujo a la mitad (32 Hz).

La fuerza móvil representó nuevamente un vehículo tipo T3S3 completamente cargado (54 toneladas), pero ahora para cruzar el puente completo ($L = 407.21$ m) con una velocidad de 2 m/s. El carril seleccionado fue el carril derecho del lado aguas arriba y las mediciones se establecieron en los nodos del lado derecho del tablero (lado aguas arriba) donde la fuerza móvil no pasa.

Como se explicó anteriormente, cuando ocurrió la falla del T1S5, la instrumentación no estaba planeada para adquirir datos útiles a utilizarse con este MAEW y, desafortunadamente, los sensores de aceleración no se colocaron en el tablero. Por lo tanto, considerando la instrumentación disponible al momento de romperse el tirante, las mediciones de deformación del tablero serían las más útiles y, por lo tanto, para estas simulaciones numéricas, sólo se usaron las señales de desplazamiento.

En la figura 4.25, se muestran los diagramas CWT a partir de las señales originales para el caso sano y los casos de tirantes dañados, mientras que en la figura 4.26 se exponen los mismos diagramas, pero después de restar las señales, sólo para mostrar que la resta fue muy útil para comenzar a proporcionar una pista de la ubicación del daño incluso cuando el rango conveniente de escala todavía no se seleccionaba.

En la figura 4.27, los diagramas CWT de señales originales, sin efectos de borde y para el área de interés se muestran para los mismos tres casos. Adicionalmente, la perspectiva favorable para observar la magnitud de los coeficientes para el tirante dañado T1S5 se muestra en la figura 4.28. Finalmente, en la figura 4.29 se puede observar la correspondiente EW total promedio de señales filtradas.

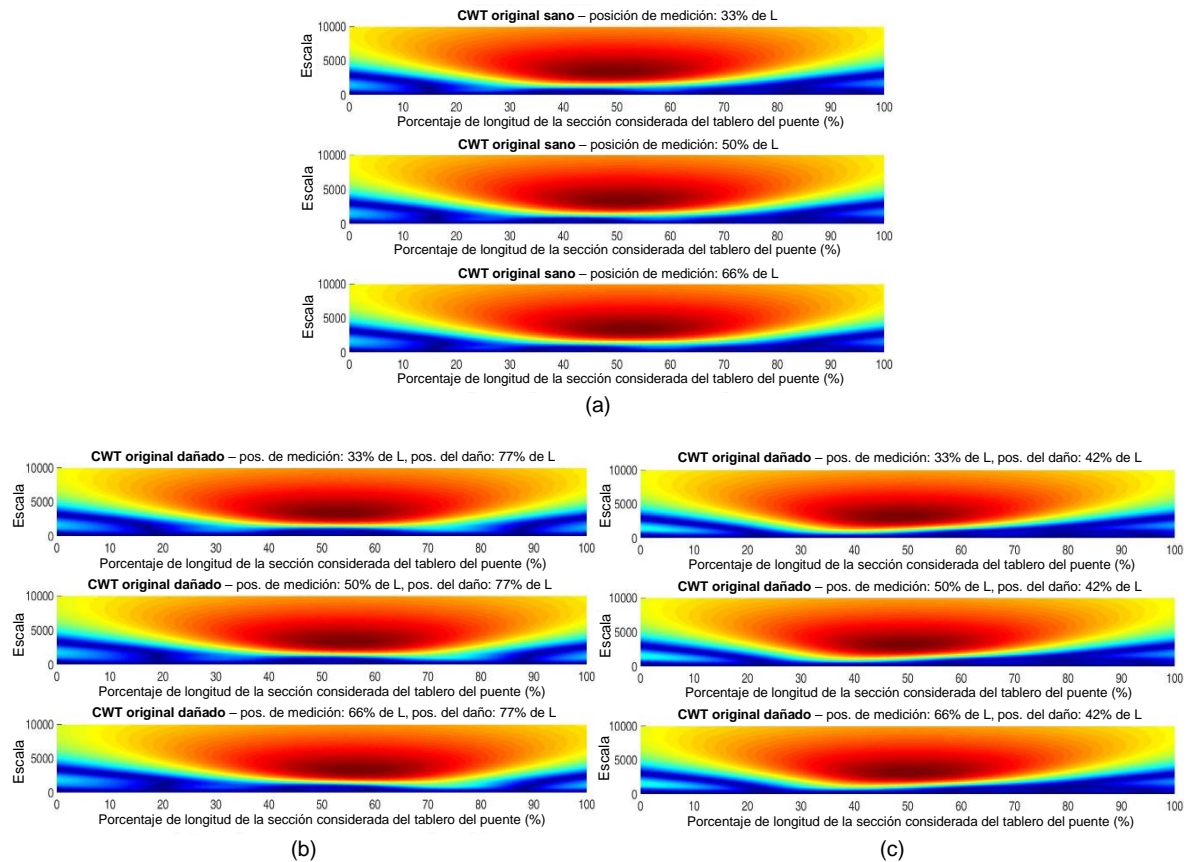


Figura 4.25. Diagramas CWT a partir de las señales de desplazamiento originales: (a) puente sano, (b) puente con tirante dañado a 0.77L y (c) puente con tirante dañado a 0.42L. Tres diferentes posiciones de medición para cada caso (de arriba a abajo: 0.33L, 0.50L y 0.66L).

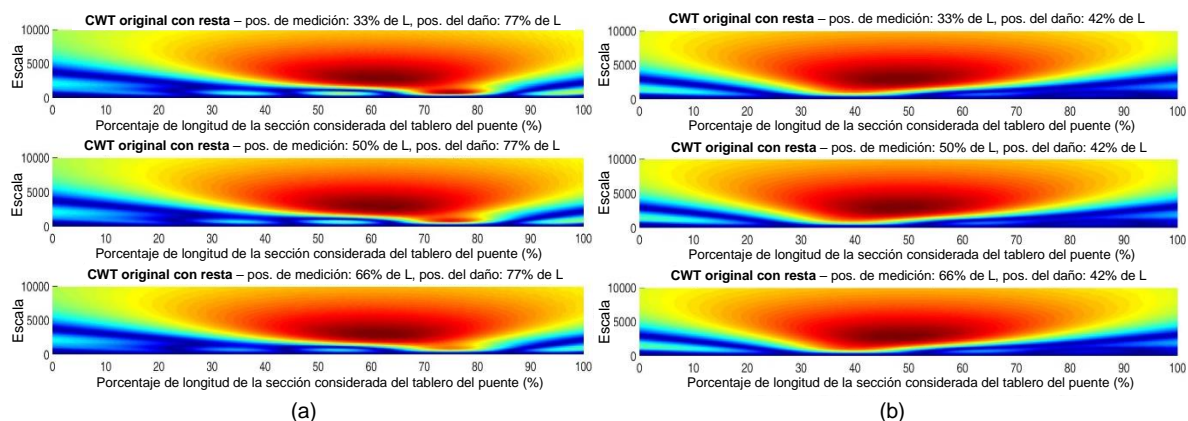


Figura 4.26. Diagramas CWT a partir de las señales originales de desplazamiento restadas: (a) puente con tirante dañado a 0.77L y (b) puente con tirante dañado a 0.42L. Tres diferentes posiciones de medición para cada caso (de arriba a abajo: 0.33L, 0.50L y 0.66L).

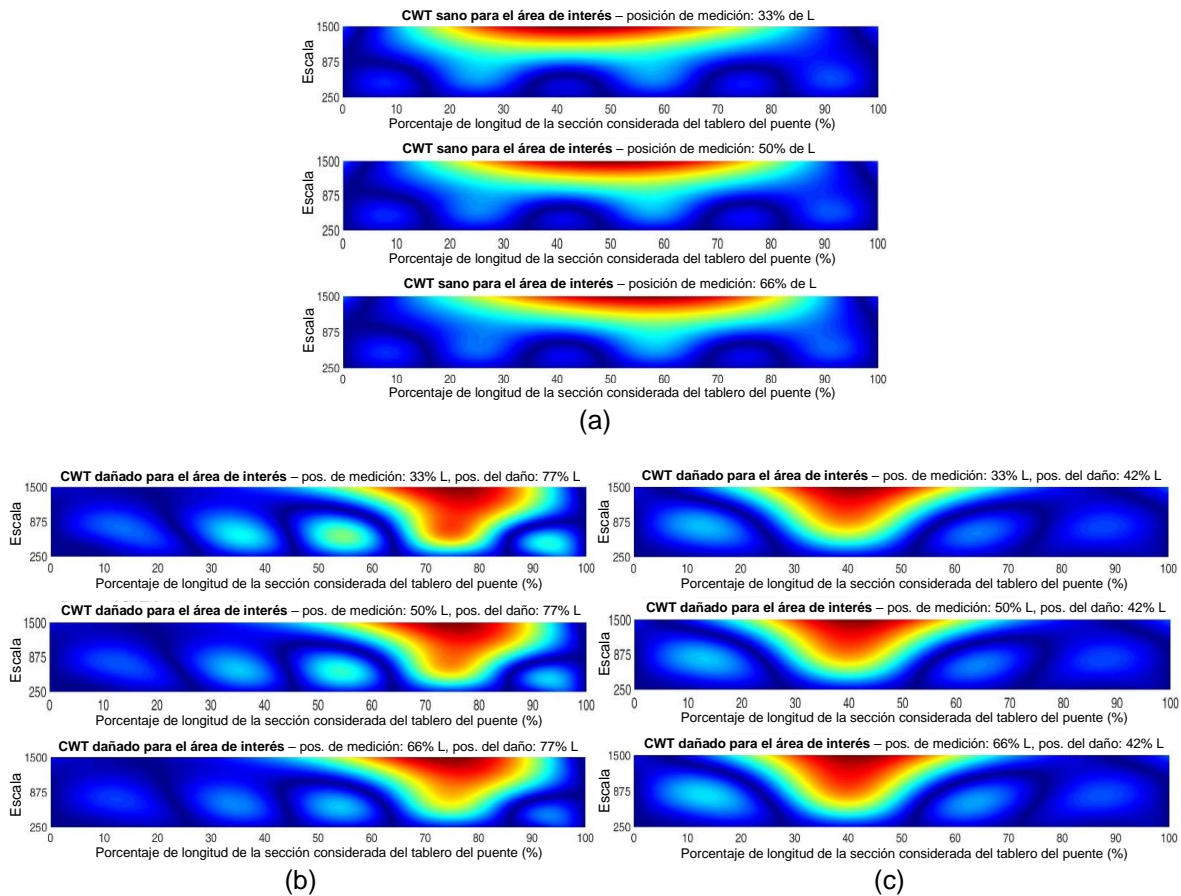


Figura 4.27. Diagramas CWT a partir de las señales de desplazamiento originales para el área de interés: (a) puente sano, (b) puente con tirante dañado a 0.77L y (c) puente con tirante dañado a 0.42L. Tres diferentes posiciones de medición para cada caso (de arriba a abajo: 0.33L, 0.50L y 0.66L).

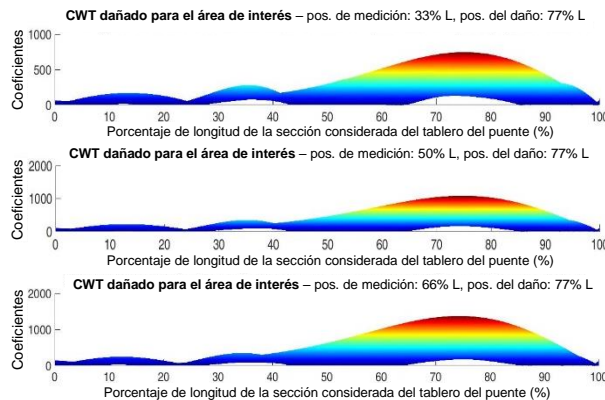
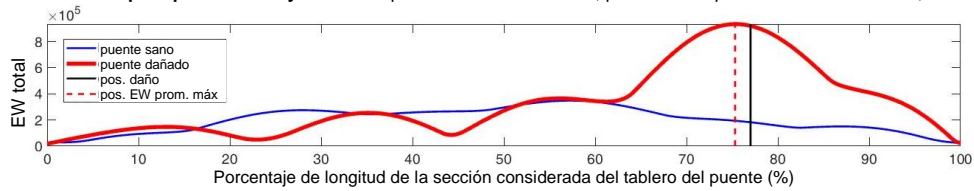


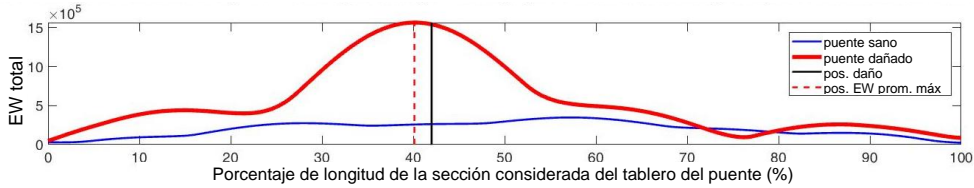
Figura 4.28. Diagramas CWT a partir de las señales de desplazamiento originales para el área de interés para puente con tirante dañado a 0.77L y tres diferentes posiciones de medición (de arriba a abajo: 0.33L, 0.50L y 0.66L), mostrando la magnitud de los coeficientes.

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

En la figura 4.25, se observan pequeñas diferencias entre los casos sanos y dañados para el amplio rango original de escala (1 a 10,000), pero en la figura 4.26, los diagramas CWT para las restas de señales presentan inclinaciones evidentes de los coeficientes más altos hacia las ubicaciones de daño para el mismo rango de escala. Esto ayudó mucho para tener una idea de las ubicaciones de los daños y definir el rango de escala para calcular la EW.

La detección y localización de los tirantes dañados fue posible usando el mismo rango de escala definido como el más conveniente para el caso de daño en el tablero (250 a 500); sin embargo, a fin de utilizar un rango de escala más amplio donde los coeficientes más altos tienen influencia alrededor de las ubicaciones de daño, el rango de escala conveniente para estos casos de tirantes dañados se definió de 250 a 1,500 y los diagramas CWT correspondientes para el área de interés se exponen en la figura 4.27. Las evidencias de daño son claras. Adicionalmente, en la figura 4.28 se puede apreciar la magnitud de los coeficientes alrededor de 1,000 para el caso del tirante dañado T1S5, lo cual es útil para comparar con el caso real y el caso numérico de daño en el tablero.

Finalmente, en la figura 4.29, 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.

El incremento significativo de la EW para los casos presentados en la figura 4.29 respecto a los casos de tablero dañado mostrados anteriormente se atribuye a la naturaleza del daño, así como a la consideración —obviamente— de un rango de escala más amplio.

Así, con base en los resultados numéricos obtenidos en esta sección, la aplicación paso a paso del MAEW para detección y localización de daño 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 (Savitzky-Golay, por ejemplo).
4. Restar las señales actuales (probablemente dañadas) y las correspondientes señales sanas.
5. Aplicar la *Continuous Wavelet Transform* (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 adecuada *mother wavelet* (*Mexican hat* para puentes) 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 conveniente de escala (área de interés).
9. Calcular y graficar el área bajo la curva (EW) para cada diagrama CWT de los casos sanos y restados (en cada posición de medición) a lo largo tanto del rango de escala seleccionado como 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.

5 Resultados del caso de falla real

En esta sección, se analizan 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 1 de la semiarpa 5 - T1S5), y se comparan con los respectivos del puente cuando se aseguró que estuviera sano (*baseline*) el 22 de agosto de 2014. Estos datos corresponden con las mediciones en el tablero obtenidas con galgas extensométricas (125 Hz de frecuencia de muestreo) (ver figura 1.5).

A pesar de que, como se mencionó anteriormente, no se pudo realizar una prueba controlada con la instrumentación adecuada para seguir los pasos del MAEW y advertir sobre un daño en el tirante T1S5 lo suficientemente temprano como para evitar su falla, los datos adquiridos con tráfico aleatorio casi un año antes del incidente (caso sano) y algunos minutos antes del colapso del tirante (caso dañado) son valiosos para demostrar que este método es promisorio y su aplicación podría haber evitado esta falla y prevenir accidentes en el futuro.

Primero, en la figura 5.1b, se muestra el espectrograma filtrado dañado (basado en la STFT) del punto de medición R2 (figura 1.5) durante 840 segundos de monitoreo. Sólo se puede distinguir una marca evidente alrededor del segundo 674 y corresponde con el instante en que el tirante se rompió; sin embargo, antes y después de ese evento, no hay indicadores sobre un tirante dañado ni la ausencia de un tirante, respectivamente, aun cuando se filtró la señal y el punto de medición es el más cercano al anclaje del tirante dañado en el tablero. Además, comparando los primeros 670 segundos de la figura 5.1b (cuando el daño existía y la falla era inminente) con la figura 5.1a que muestra el respectivo espectrograma durante 120 segundos de adquisición del caso sano (*baseline*), no se puede establecer ninguna pista de daño ya que se parecen mucho entre sí. Estos resultados coincidieron con los espectrogramas numéricos mostrados en la Sección 4 y justificaron la necesidad de proporcionar un método más confiable para detectar daño.

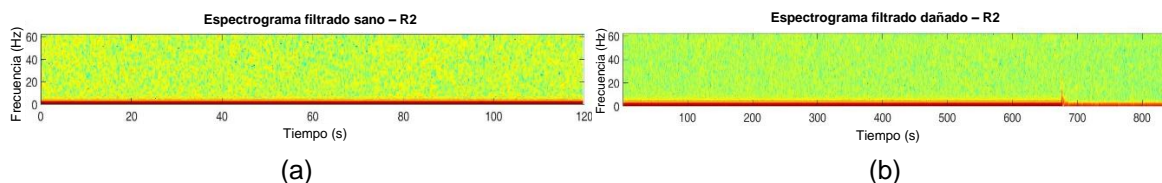


Figura 5.1. Espectrogramas a partir de las señales experimentales filtradas: (a) puente sano y (b) tirante dañado T1S5.

Por otro lado, la EW siempre fue claramente mayor para las mediciones dañadas en lugar de las sanas. Esto se observó para todos los puntos de medición

analizando los diagramas CWT y de EW para diferentes períodos de 120 segundos de señales dañadas adquiridas el 10 de junio de 2015 antes del accidente, y períodos de 120 segundos de señales sanas adquiridas el 22 de agosto de 2014, así como en pocos meses antes y después de esa última fecha. Por fines de brevedad, sólo se muestran los diagramas CWT y de EW de tres puntos de medición (R1, R2 y R4) y durante los mismos 120 segundos del espectrograma de la figura 5.1a para el caso sano (figura 5.2 y figura 5.5a, respectivamente) y durante los primeros 120 segundos del espectrograma de la figura 5.1b para el caso dañado (figura 5.3 y figura 5.5b, respectivamente).

Comparando los diagramas CWT de las figuras 5.2 (sanos) y 5.3 (dañados) sin efectos de borde y para el área de interés sugerida en la parte numérica (escala de 250 a 500), la mayor actividad *wavelet* y los coeficientes *wavelets* más altos se presentaron claramente para el caso dañado. Además, en la figura 5.3 se puede notar que los coeficientes *wavelets* más altos para el caso dañado se obtuvieron 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 los coeficientes *wavelets* con respecto al caso *baseline* y tuvieron que sugerir que el daño estaba ubicado alrededor de R2.

Como se mencionó anteriormente, se mostraron sólo los resultados de tres puntos de medición, pero incluso considerando el resto de las mediciones, R2 presentó los coeficientes *wavelets* más altos. Además, para saber qué tan grande fue el incremento de los coeficientes *wavelets* en el momento del colapso del tirante T1S5, el correspondiente diagrama CWT se muestra en la figura 5.4. A pesar de que el tipo de señales numéricas y experimentales no era el mismo y de que múltiples factores incluidos en los datos reales no pueden representarse numéricamente, existe una buena concordancia respecto a la magnitud de los coeficientes *wavelets* para los casos numéricos y experimentales del PRP con tirante dañado.

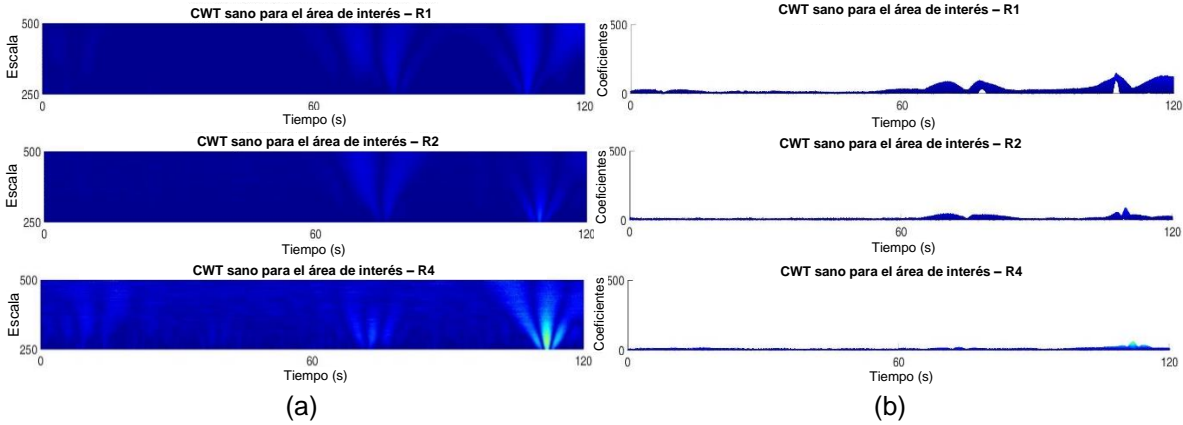


Figura 5.2. Diagramas CWT a partir de las señales experimentales filtradas de puente sano para el área de interés: (a) mostrando la escala en el eje vertical y (b) mostrando los coeficientes en el eje vertical. Tres diferentes posiciones de medición para cada caso (de arriba a abajo: R1, R2 y R4).

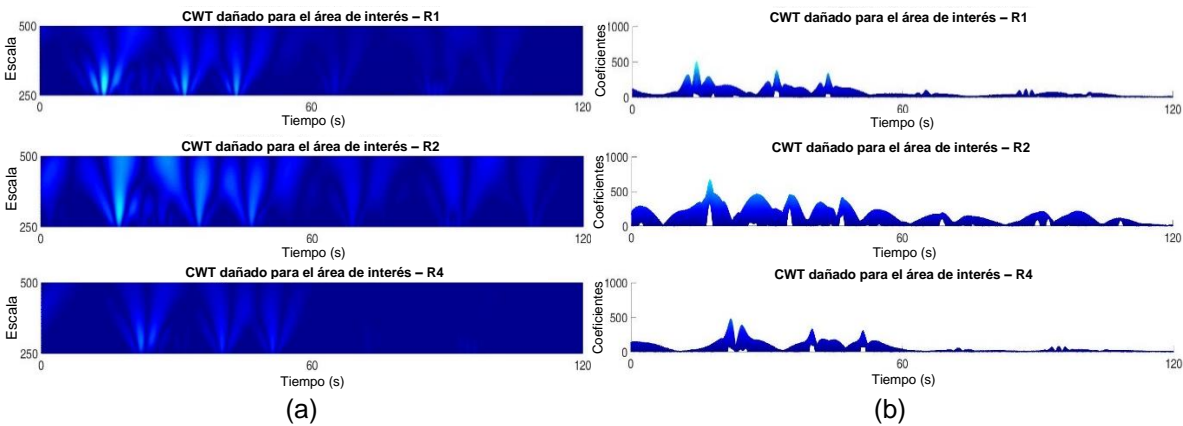


Figura 5.3. Diagramas CWT a partir de las señales experimentales filtradas de puente con tirante dañado T1S5 para el área de interés: (a) mostrando la escala en el eje vertical y (b) mostrando los coeficientes en el eje vertical. Tres diferentes posiciones de medición para cada caso (de arriba a abajo: R1, R2 y R4).

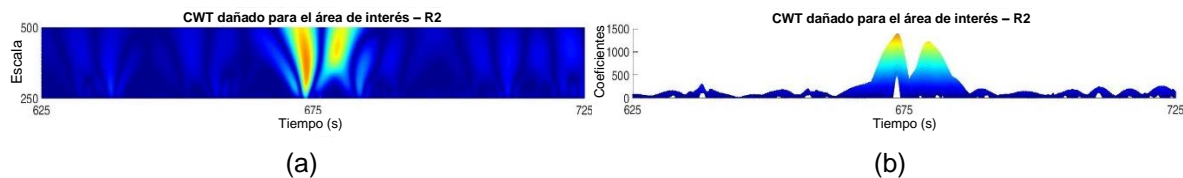


Figura 5.4. Diagrama CWT a partir de la señal experimental filtrada de la posición de medición R2 alrededor del momento del colapso del tirante T1S5: (a) mostrando la escala en el eje vertical y (b) mostrando los coeficientes en el eje vertical.

Finalmente, las EW totales obtenidas de los diagramas CWT de las figuras 5.2 y 5.3 se muestran en la figura 5.5, mientras que en la figura 5.6, 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 5.5) y la máxima EW total promedio es casi cinco veces mayor para el caso dañado con respecto al caso sano (figura 5.6). Este ejercicio se realizó adicionalmente para cuatro períodos diferentes de 120 segundos de puente sano y puente con tirante dañado y, en todos los casos, la EW promedio fue mayor para el puente dañado y las magnitudes de las máximas EW totales promedio fueron similares a las que se muestran en la figura 5.6. 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.

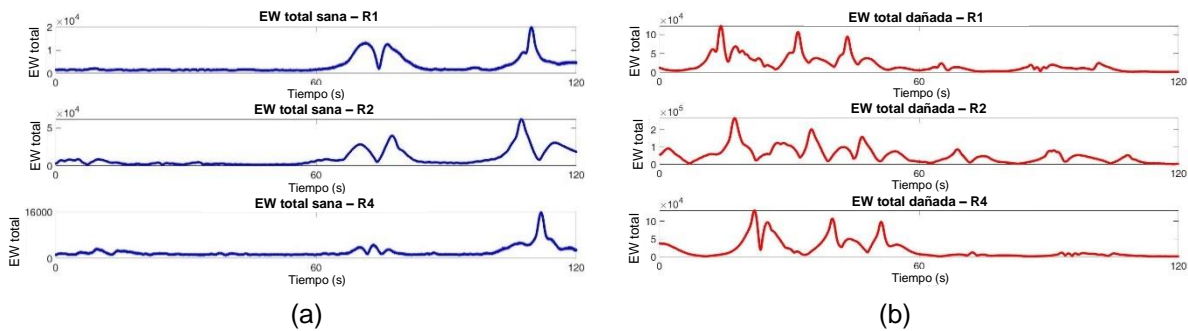


Figura 5.5. EW total a partir de las señales experimentales filtradas: (a) puente sano y (b) puente con tirante dañado T1S5. Tres diferentes posiciones de medición para cada caso (de arriba a abajo: R1, R2 y R4).



Figura 5.6. EW total promedio a partir de las señales experimentales filtradas para puente sano vs. puente con tirante dañado T1S5.

Conclusiones

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.

Bibliografía

- [1] Machorro López, J. M., A. Bellino, S. Marchesiello y L. Garibaldi, "Damage detection for beams subject to moving loads based on wavelet transforms", The Eleventh International Conference on Computational Structures Technology (CST-2012), Dubrovnik, Croacia, 2012.
- [2] Aktan, A. E. y K. A. Grimmelsman, "The role of NDE in bridge health monitoring", *Proceedings of the SPIE: Conference on Nondestructive Evaluation of Bridges and Highways II*, SPIE 3587, Newport Beach, California, EUA, 1999.
- [3] Friswell, M. I. y D. J. Inman, "Sensor validation for smart structures", IMACXVIII: Conference on Structural Dynamics, San Antonio, Texas, EUA, 2000.
- [4] Pines, D. J. y P. A. Lovell, "Conceptual framework of a remote wireless health monitoring system for large civil structures", *Journal of Smart Materials and Structures*, núm. 7, 1998.
- [5] Aktan, A. E., A. J. Helmicki y V. J. Hunt, "Issues in health monitoring for intelligent infrastructure", *Journal of Smart Materials and Structures*, núm. 7, 1998.
- [6] Thomas, G., "Overview of nondestructive evaluation technologies", *Proceedings of the SPIE: Conference on Nondestructive Evaluation of Aging Utilities*, SPIE 2454, Oakland, California, EUA, 1995.
- [7] Chase, S. B., "Developing NDT technologies for the next century", *Structural Materials Technology: An NDT Conference*, San Diego, California, EUA, 1996.
- [8] Doebling, S. W., C. R. Farrar y M. B. Prime, "A summary review of vibration-based damage identification methods", *The Shock and Vibration Digest*, núm. 30, 1998.
- [9] Corts, T. E., *Bliss and tragedy: the Ashtabula railway-bridge accident of 1876 and the loss of P.P. Bliss*, Sherman Oak Books, Birmingham, Alabama, EUA, pp. 145-158, 2003.
- [10] *Tay Bridge Disaster: Appendix to the Report of the Court of Inquiry*, Houses of Parliament, Londres, Reino Unido, pp. 1-49, 1880.
- [11] LeRose, C., "The collapse of the Silver Bridge", *West Virginia Historical Society Quarterly*, vol. 15, núm. 4, p. 1, 2001.

- [12] Davey, M. y M. L. Wald, "Potential flaw is found in design of fallen bridge", *The New York Times*, EUA, 8 de agosto de 2007.
- [13] AFP, "¿Por qué se derrumbó el Puente Morandi en Génova, Italia?", *El Universal*, México, 14 de agosto de 2018.
- [14] Golmohamadi, M., H. Badri y A. Ebrahimi, *Damage diagnosis in bridges using wavelet*, IACSIT - IPCSIT, núm. 28, pp. 202-207, 2012.
- [15] McGetrick, P. J. y C. W. Kim, "A parametric study of a drive by bridge inspection system based on the Morlet wavelet", *Key Engineering Materials*, núm. 1, pp. 262-269, 2013.
- [16] Reddy, M. D. y S. Swarnamani, "Structural damage identification using signal processing method", *International Journal of Advanced Structural Engineering*, núm. 5, pp. 5-16, 2013.
- [17] Walia, S. K., P. K. Patel, H. K. Vinayak y R. Parti, "Joint discrepancy evaluation of an existing steel bridge using time-frequency and wavelet-based approach", *International Journal of Advanced Structural Engineering*, núm. 5, pp. 14-25, 2013.
- [18] Quiñones, M. M. y L. A. Montejo, "Experimental and numerical evaluation of wavelet-based damage detection methodologies", *International Journal of Advanced Structural Engineering*, núm. 7, pp. 69-80, 2015.
- [19] Zhu, J. y Y. Sun, "Study of a novel wavelet packet energy-based damage detection index for bridges", *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, núm. 35, pp. 7-22, 2015.
- [20] Li, Q. y D. Li, "Structure damage identification under ambient excitation based on wavelet packet analysis", *Journal of Physics*, núm. 842, pp. 1-12, 2017.
- [21] Chen, Y. y S. O. Oyadiji, "Damage detection using modal frequency curve and squared residual wavelet coefficients-based damage indicator", *Mechanical Systems & Signal Processing*, núm. 83, pp. 385-405, 2017.
- [22] Ercolani, G. D., D. H. Félix y N. F. Ortega, "Detección de daño en un tablero de puente de hormigón pretensado mediante la transformada wavelet", *Mecánica Computacional*, vol. XXXVI, pp. 185-193, 2018.
- [23] Astiz, M. A., "Composite construction in cable-stayed bridge towers", IABSE International Conference on Composite Construction-Conventional and Innovative, *Conference Report*, Innsbruck, Austria, pp. 127-132, 1997.
- [24] ASTM Standard A148/A 148M-15a. "Standard specification for steel castings, high strength, for structural purposes", ASTM International, West Conshohocken, Pensilvania, EUA, 2015.

- [25] Aguirre, A. y 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.
- [26] López, A. y 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.
- [27] Terán, J., M. Arroyo, M. Lomelí y 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.
- [28] Liew, K. y Q. Wang, "Application of wavelet theory for crack identification in structures", *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 124, núm. 2, pp. 152-157, 1998.
- [29] Liu, C. L., *A Tutorial of the Wavelet Transform*, pp. 25-28, 2010.



Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El Colorado-Galindo"
Parque Tecnológico San Fandila
Mpio. Pedro Escobedo, Querétaro, México
CP 76703
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610
Fax +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

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