

IDENTIFICACIÓN DE VEHÍCULOS CON SOBRECARGA EN UN PUENTE ATIRANTADO INSTRUMENTADO

IDENTIFICATION OF OVERLOADED VEHICLES ON AN
INSTRUMENTED CABLE-STAYED BRIDGE

Violeta Rodríguez Millán^{1*}
Luis Álvaro Martínez Trujano²
Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández¹
Jaime Moisés Horta Rangel¹
Francisco Pérez Moreno¹
Francisco Javier Carrión Viramontes²
Juan Antonio Quintana Rodríguez²

¹Facultad de Ingeniería,
Universidad Autónoma de Querétaro

²Instituto Mexicano del Transporte
Querétaro, México

*violeta.9727@gmail.com
migperez@uaq.mx
amartinez@imt.mx
carrion@imt.mx
jaquintana@imt.mx



RESUMEN

Este estudio propone una metodología para identificar vehículos que presenten sobrecarga, los cuales influyen en la degradación prematura por fatiga en los elementos estructurales de un puente. Mediante el sistema de monitoreo del puente río Papaloapan, se obtuvieron registros de deformación de un conjunto de extensómetros en pruebas experimentales controladas; en ellas transitaban vehículos tipo C3 con peso conocido y velocidad controlada. Posteriormente, a través del análisis de información, se desarrolló e implementó un algoritmo que permite identificar vehículos C3 con sobrecarga de acuerdo a la normativa vigente, mediante la correlación entre la respuesta dinámica (deformación máxima) y el peso bruto vehicular. Finalmente, se establece un modelo matemático que permite estimar el peso bruto del vehículo.

Palabras clave: BWIM, EST, monitoreo estructural, puente atirantado, puente río Papaloapan, sobrecarga.

the analysis of the information, an algorithm was developed and implemented to identify overloaded C3 vehicles, according to current regulations, through the correlation between the dynamic response (maximum deformation) and the gross vehicle weight. Finally, a mathematical model is established to estimate the gross vehicle weight.

Keywords: EST, SHM, overload truck, río Papaloapan Bridge, BWIM, cable-stayed bridge.

INTRODUCCIÓN

La historia de los puentes, a nivel mundial, ha estado marcada por desastres que se derivan de factores como el exceso de peso. Para evitar catástrofes de ese tipo, es de suma importancia detectar y dar seguimiento de los daños para estimar el deterioro de los elementos estructurales en infraestructura civil, ya que el tránsito continuo de vehículos de carga con exceso de peso puede comprometer el equipamiento del transporte.

De acuerdo con los estudios de campo del Instituto Mexicano del Transporte (IMT), el 18 % de los vehículos de carga circulan con pesos excesivos. En el caso particular del puente río Papaloapan, se tomó como referencia el límite de 66.5 toneladas (t) para un peso bruto vehicular máximo; la vida útil tiene un decremento del 5 % cuando el límite aumenta a 80 toneladas y de un 12 % con los niveles de sobrecarga que se reportan actualmente [1].

El tránsito vehicular es causal de la mayoría de los efectos dinámicos en la estructura [2]. Además, los niveles de violación a

El respeto a las leyes de carga vehicular es imperativo para el mantenimiento de la vida útil de los puentes y demás estructuras de tránsito vehicular. Sistemas de monitoreo son herramientas requeridas para medir el cumplimiento de dichas normas. Con base en puente río Papaloapan se ofrece la oportunidad de crear un método eficiente de medición y control.

ABSTRACT

This study proposes a methodology to identify overloaded vehicles, which can cause premature fatigue degradation in the structural elements of a bridge. By means of the monitoring system of the Papaloapan River bridge, deformation records were obtained

from a set of strain gauges in controlled experimental tests; in these tests, C3 type vehicles with known weight and controlled speed were transited. Subsequently, through



la reglamentación sobre pesos y dimensiones en México provocan que gran parte de los criterios y procedimientos norteamericanos que se utilizan en el cálculo de capacidades y el diseño de carreteras interurbanas y suburbanas no sean directamente aplicables para México [3].

SISTEMAS DE PESAJE EN MOVIMIENTO

La sobrecarga de vehículos de autotransporte es un problema común en las estructuras que conforman la red carretera; se refiere a aquellos vehículos que transitan con cargas que exceden las normas establecidas, los cuales, al transitar sobre las vías de transporte, provocan grave daño estructural y aceleran la degradación de la infraestructura. Debido a lo anterior, es posible afirmar que la principal dificultad que acorta la vida útil de la estructura en puentes es la fatiga.

La American Society for Testing and Materials (ASTM E1318-02) define el pesaje de vehículos en movimiento, mejor conocido como pe-

saje dinámico (*wim*, *weigh-in-motion*), como el proceso mediante el cual se dimensionan las fuerzas dinámicas de los neumáticos de un vehículo de autotransporte en movimiento y se estiman las correspondientes cargas por neumático del vehículo estático [4]. En el caso de puentes, una de las tecnologías más comunes es el sistema de pesaje en movimiento (*BWIM*, *bridge weigh-in-motion*); al igual que *wim*, no necesita la interrupción del flujo vehicular para el pesaje de transporte circulante, y es capaz de medir parámetros de operación para determinar el peso o lado de eje de los vehículos de autotransporte [5]. A su vez, el monitoreo de salud estructural (*SHM*-Structural Health Monitoring) proporciona una herramienta para afianzar la integridad y seguridad del puente; en este sentido, también desplegarse del *BWIM*. La instrumentación de un sistema *BWIM* está conformada por un sistema de adquisición, uno de comunicación, uno de suministro eléctrico y sensores que registran de manera global las respuestas de esfuerzos por tensión en el puente [6].

PUENTE RÍO PAPALOAPAN

Sobre el río Papaloapan se eleva un puente homónimo de tipo atirantado ubicado en el kilómetro 85 + 980 de la autopista la Tinaja-Acayucan, en el estado de Veracruz, México. Ha estado en servicio desde el año 1995; cuenta con una longitud total de 407 m, un claro máximo de 206 m, y se encuentra suspendido por 8 semi-arpas de 14 tirantes cada una (Figura 1) [7].

El puente río Papaloapan desempeña un papel primordial dentro de la red federal carretera, ya que permite el intercambio económico entre el centro y el sur del país [8]. Es también el primero instrumentado, monitoreado en tiempo real y evaluado de forma permanente por el Centro de Monitoreo de Puentes y Estructuras Inteligentes (*CEMPEI*) de la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (*SICT*) [9].

A través del sistema de monitoreo del puente río Papaloapan, se ha iniciado el desarrollo de herramientas de detección como el algoritmo para la identificación de



Figura 1. Puente río Papaloapan.



Figura 2. Vehículo de configuración C3.

carga viva por tránsito vehicular, entre otros [2].

METODOLOGÍA

A continuación, se describe el proceso metodológico empleado al desarrollo e implementación de un nuevo algoritmo que permita identificar con mayor precisión los vehículos de autotransporte que presenten sobrecarga en un puente atirantado.

DEFINICIÓN DE TIPO DE VEHÍCULO EN PRUEBAS EXPERIMENTALES

Inicialmente, se plantea efectuar ensayos controlados a vehículos de autotransporte de configuración C3 que transitan el puente río Papaloapan a diferentes velocidades. La configuración vehicular C3 (Figura 2) consta de un camión unitario (C) que se define como un vehículo automotor destinado al

transporte de carga con 3 ejes de ocho o diez llantas.

Cabe mencionar que se decidió utilizar el vehículo C3 porque la mayor parte del peso se encuentra en los ejes traseros y, debido a la longitud del vehículo, la carga se concentra en un área menor, de modo que tiene un espectro de carga con niveles de sobrecarga importantes.

De acuerdo con los datos viales del año 2021, se registró un tráfico diario promedio anual (TDPA) de 5794 vehículos en el puente río Papaloapan; 348 de ellos conciernen al tipo C3. Por otro lado, para regular la configuración vehicular, la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017 demanda que el traslado vehicular en las vías generales de comunicación se ejecute en condiciones de seguridad, vigilando que el peso y las dimensiones no inflijan daños a la integridad de las personas ni a la infraestructura carretera [10]. Dentro de este

marco, el peso bruto vehicular (PBV) máximo autorizado para la configuración vehicular C3 se indica en la Tabla 1.

DESARROLLO DEL PLAN Y ESTRATEGIA PARA EVALUAR LA INFORMACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO DURANTE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES

Tras las pruebas preliminares, se elaboró un programa de actividades para efectuar los ensayos, se gestionaron las licencias para trabajar sobre el puente, se elaboraron plantillas para el registro de los pesajes y se diseñaron los planos de la ubicación de sensores en el tablero. A fin de registrar la respuesta dinámica del puente ante las cargas vivas aplicadas, el sistema de monitoreo permanente cuenta una red de fibra óptica que conecta 24 sensores de deformación, 24 acelerómetros, 8 medidores de inclinación, 5 sensores de

Tabla 1. Peso bruto vehicular (en toneladas) autorizado por tipo de vía para un C3.

| EJES | LLANTAS | PESO BRUTO VEHICULAR (T) | | | |
|------|---------|--------------------------|------|------|------|
| | | ET Y A | B | C | D |
| 3 | 8 | 24.0 | 19.0 | 17.0 | 16.0 |
| | 10 | 27.5 | 23.0 | 20.0 | 18.5 |



temperatura y 1 sensor de desplazamiento, además de dos cámaras de video. Para correlacionar el peso de los vehículos de prueba, se registró la respuesta dinámica de los sensores de deformación unitaria (Figura 3): se disponen 10 sensores bajo cada una de las dos vigas principales del tablero del puente y un sensor en el costado, a media altura de cada torre.

En la Tabla 2 se muestra una descripción de las pruebas experimentales controladas y los vehículos de autotransporte utilizados.

En la Tabla 3 se observan los pesos de los vehículos C3 obtenidos mediante una pesadora estática de tipo portátil, instalada *in situ* para determinar los pesos por eje y el PBV.

EJECUCIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN DE PRUEBAS EXPERIMENTALES

La ejecución y evaluación de la información del sistema de monitoreo se llevaron a cabo en pruebas experimentales con vehículos de autotransporte de configuración vehicular C3 de peso conocido, circulando a velocidades establecidas sin tráfico vehicular.

IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES ESTRUCTURALES SENSIBLES AL PESO VEHICULAR

Durante las pruebas, se registraron señales de deformación unitaria con una tasa de muestreo de 125 Hz en diferentes puntos a lo largo del tablero del puente: puntos de medición R1, R2, ..., R12. Respecto a esto, se advirtió que la amplitud de respuesta dinámica por el paso de los vehículos de prueba varía dependiendo de la carga del vehículo C3.

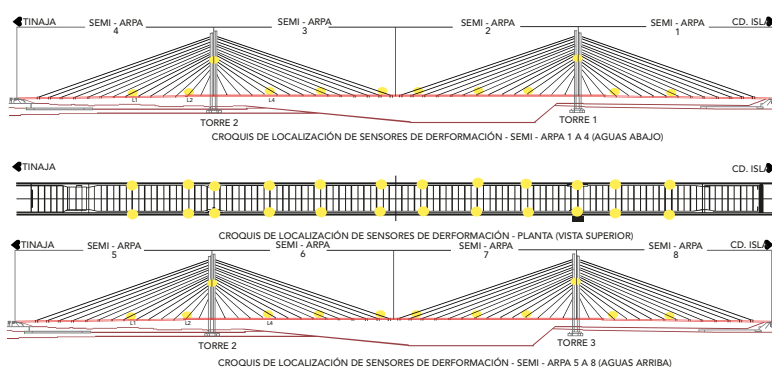


Figura 3. Ubicación de sensores de deformación en el puente río Papaloapan.

Tabla 2. Descripción de pruebas experimentales controladas.

| PRUEBA | VEHÍCULOS | DESCRIPCIÓN |
|--------|---|---|
| DIN1 | Baja/pesado/9-XDB-40A, 2: baja/ligero/XU-22454, 3: alta/pesado/XM-0833-A y 4: alta/ligero/XK-5966-A | 4 vehículos C3: 1 pesado y 1 ligero por el carril de baja; 1 pesado y 1 ligero por el carril de alta a 20 km/h. |
| DIN2 | Baja/pesado/9-XDB-40A, 2: baja/ligero/XU-22454, 3: alta/pesado/XM-0833-A y 4: alta/ligero/XK-5966-A | 4 vehículos C3: 1 pesado y 1 ligero por el carril de baja; 1 pesado y 1 ligero por el carril de alta a 60 km/h. |
| DIN3 | Baja/pesado/9-XDB-40A, 2: baja/ligero/XU-22454, 3: alta/pesado/XM-0833-A y 4: alta/ligero/XK-5966-A | 4 Vehículos C3: 1 pesado y 1 ligero por el carril de baja; 1 pesado y 1 ligero por el carril de alta a 60 km/h. |
| DIN4 | Baja/pesado/9-XDB-40A, 2: baja/ligero/XU-22454, 3: alta/pesado/XM-0833-A y 4: alta/ligero/XK-5966-A | 4 Vehículos C3: 2 pesados por el carril de baja; 2 ligeros por el carril de alta a 20 y 60 km/h. |

Tabla 3. Pesos de vehículos: pruebas dinámicas en el puente río Papaloapan.

| PLACA | EJE 1 | EJE 2 | EJE 3 | PBV |
|-----------|-----------|-------|-------|------|
| | TOTAL | | | |
| | PESOS (T) | | | |
| XU-22454 | 5.2 | 8.9 | 8.5 | 22.6 |
| 9-XDB-40A | 8 | 17.2 | 17.3 | 42.5 |
| XK-5966-A | 5.4 | 9.6 | 10.4 | 25.3 |
| XM-0833-A | 7.5 | 16.3 | 16 | 39.7 |

DISEÑO Y DESARROLLO DE UN ALGORITMO PARA DETERMINAR LA CARGA DE LOS VEHÍCULOS QUE TRANSITAN SOBRE EL PUENTE

En cuanto al proceso de diseño y desarrollo del algoritmo se utilizó el lenguaje de programación Python. Inicialmente, para que la señal de deformación unitaria sea procesada, se remueve la señal asociada a los cambios térmicos y por carga estática, denominada *offset*. El desarrollo

consiste en restar aritméticamente la media de los datos a la señal original, y se repite para cada extensómetro para adecuar los datos antes de filtrarlos. Con la finalidad de disminuir los resultados indeseados, generados por el mismo sistema de adquisición, se emplea un preprocesamiento de datos mediante un filtro tipo Butterworth en configuración pasa banda de segundo orden, con una frecuencia baja de 0.01 Hz y una alta de 1.5 Hz [11].

Tras el filtrado, se continúa con una función de búsqueda para encontrar los picos de tensión de la señal filtrada, establecer la posición en el vector de tiempo e identificar los alcances correspondientes a las deformaciones unitarias máximas ($\mu\epsilon$) causadas por cada uno de los vehículos que transitaron por el puente; los picos corresponden al movimiento de un vehículo C3 de peso conocido. Posteriormente, se correlaciona la amplitud máxima en el sensor de deformación elegido con los datos del peso bruto vehicular obtenidos por la pesadora estática. En conclusión, mediante una regresión lineal, se obtiene una función matemática que describe la relación entre las amplitudes máximas de deformación por carga viva y el peso bruto vehicular.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO

Tras la obtención de las señales durante las pruebas dinámicas, se procesó la señal mediante el algoritmo descrito. Al aplicar el filtro, se obtuvo de la prueba DIN1 en el sensor R7 la siguiente señal (Figura 4):

Después de aplicar el filtrado de la señal, se continuó con la búsqueda de las amplitudes máximas de deformación en cada sensor (Figura 5).

Tras repetir el procedimiento para cada prueba dinámica, se obtuvo el valor correspondiente a las amplitudes máximas por evento. A continuación, en las Tablas 4 y 5, se exponen las deformaciones por carga viva en el sensor R7 y el peso bruto vehicular de los carriles de baja y alta velocidad, respectivamente.

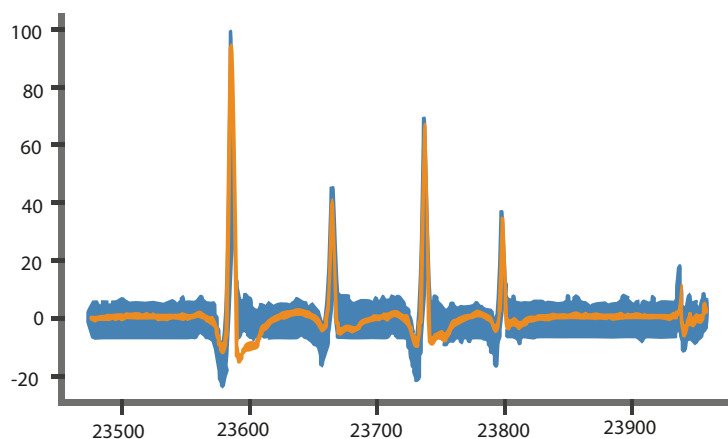


Figura 4. Señal filtrada para el sensor de deformación R7 correspondiente a la prueba DIN1.

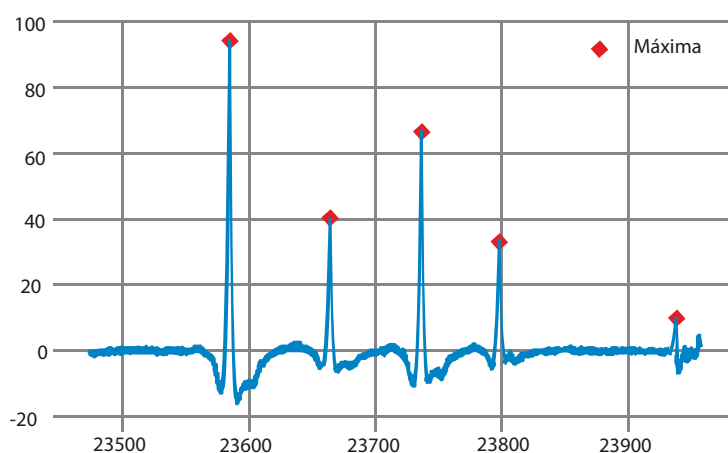


Figura 5. Identificación de eventos en señal filtrada para el sensor de deformación R7 correspondiente a prueba DIN1.

Tabla 4. Deformaciones por carga viva (R7) y peso bruto vehicular para el carril de baja velocidad.

| CARRIL DE BAJA VELOCIDAD, CUERPO A | | |
|------------------------------------|----------------------|---------|
| PRUEBA | R7 ($\mu\epsilon$) | PBV (T) |
| DIN 1 (primer evento) | 94.5136509 | 42.5 |
| DIN 1 (segundo evento) | 40.2163575 | 22.6 |
| DIN 2 (primer evento) | 97.3060945 | 42.5 |
| DIN 2 (segundo evento) | 41.36593 | 22.6 |
| DIN 3 (primer evento) | 95.2878376 | 42.5 |
| DIN 3 (segundo evento) | 42.4483465 | 22.6 |
| DIN 4 (primer evento) | 100.633134 | 42.5 |

Tabla 5. Deformaciones por carga viva (R7) y peso bruto vehicular para el carril de alta velocidad.

| CARRIL DE ALTA VELOCIDAD, CUERPO A | | |
|------------------------------------|----------------------|---------|
| PRUEBA | R7 ($\mu\epsilon$) | PBV (T) |
| DIN 1 (tercer evento) | 66.7083396 | 39.7 |
| DIN 1 (cuarto evento) | 33.947302 | 25.3 |
| DIN 2 (tercer evento) | 71.638954 | 39.7 |
| DIN 2 (cuarto evento) | 37.3821355 | 25.3 |
| DIN 3 (tercer evento) | 71.082699 | 39.7 |
| DIN 3 (cuarto evento) | 38.109593 | 25.3 |



En seguida, se aplicó un modelo de regresión lineal ajustado para cada uno de los carriles y los sensores (Figuras 6 y 7).

A partir de los datos de deformación unitaria, se obtuvieron las ecuaciones (1) y (2) para calcular el peso bruto vehicular para el carril de baja.

$$y = 0.3563x + 7.9227 \quad (1)$$

$$y = 0.4258x + 9.8716 \quad (2)$$

Donde:

x: deformación máxima a tensión generada por el paso del vehículo de autotransporte en microdeformaciones ($\mu\epsilon$).

y: peso bruto vehicular en toneladas (t).

Los resultados mostrados en las figuras 6 y 7 reflejan un $R^2 = 0.9953$ para el carril de baja velocidad y un $R^2 = 0.9855$ para el de alta, por lo que puede conocer una alta correlación entre la deformación unitaria y el peso bruto vehicular.

En la Tabla 6 se muestra un resumen de los resultados del ajuste lineal por el método de mínimos cuadrados del coeficiente R^2 para cada sensor instalado bajo la viga principal del cuerpo A, así como el modelo matemático que emana del mismo ajuste.

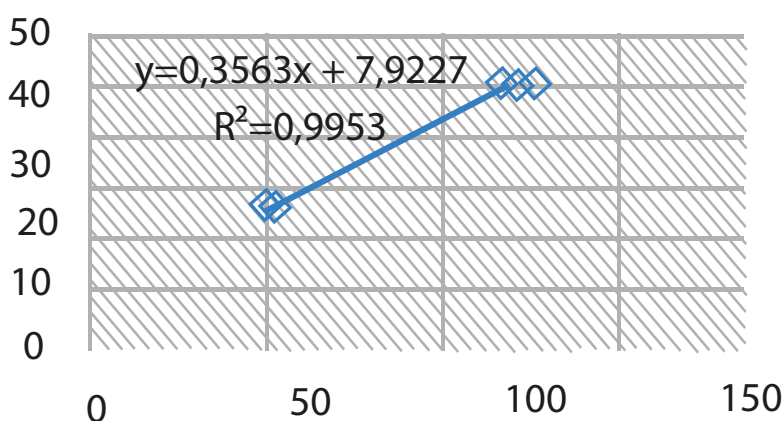


Figura 6. Carril de baja velocidad, sensor R7, cuerpo A.

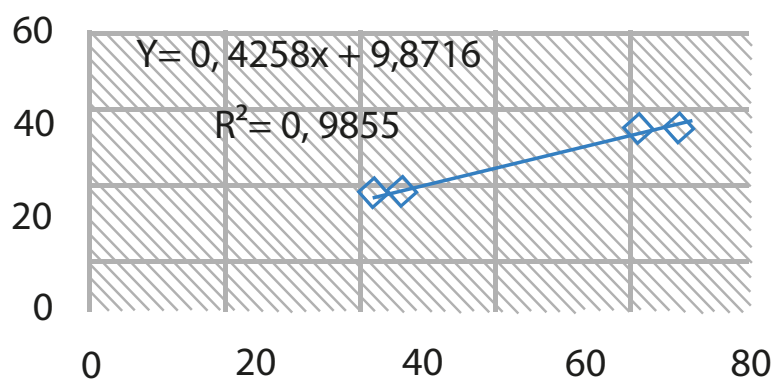
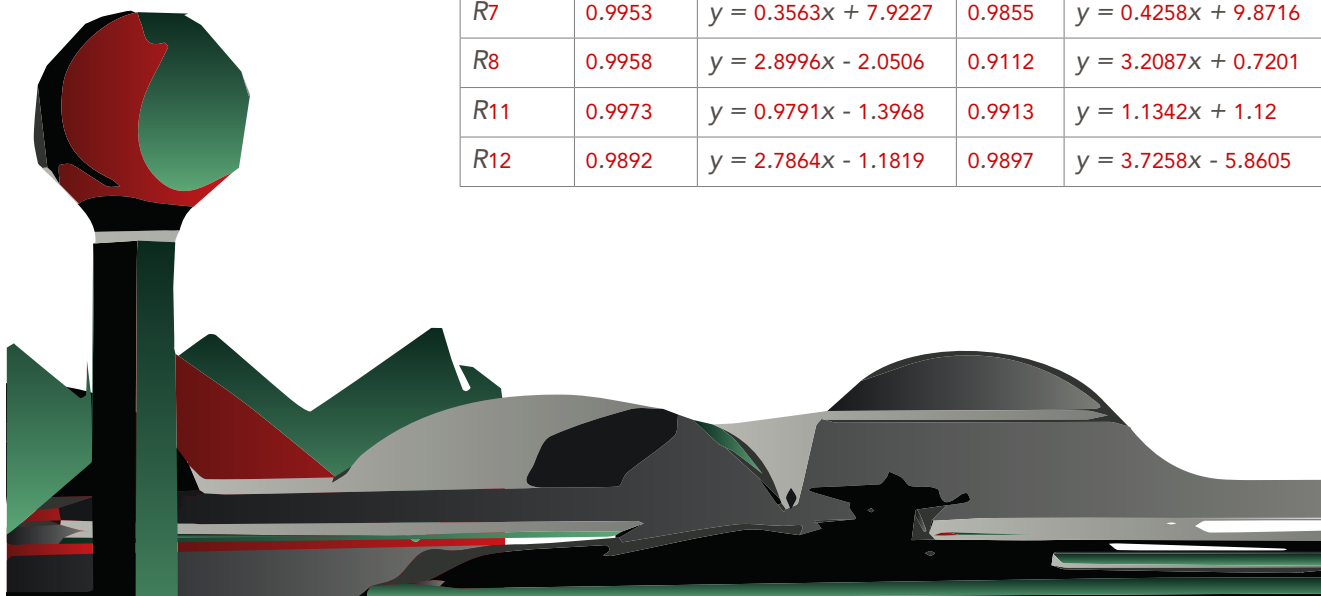


Figura 7. Carril de alta velocidad, sensor R7, cuerpo A.

Tabla 6. Coeficiente R^2 y ecuación para estimar el peso bruto vehicular (PBV) para cada sensor en carril de alta y baja velocidad.

| SENSOR | CUERPO A DEL PUENTE RÍO PAPALOPAN | | | |
|--------|-----------------------------------|------------------------|----------------|------------------------|
| | BAJA VELOCIDAD | | ALTA VELOCIDAD | |
| | R^2 | ECUACIÓN PBV | R^2 | ECUACIÓN PBV |
| R1 | 0.9959 | $y = 0.8265x - 3.151$ | 0.9826 | $y = 0.9894x - 1.5045$ |
| R2 | 0.9968 | $y = 1.021x - 0.571$ | 0.9165 | $y = 1.253x + 3.3327$ |
| R4 | 0.9901 | $y = 0.8963x + 0.2609$ | 0.9939 | $y = 0.9971x + 4.9449$ |
| R5 | 0.9973 | $y = 1.3389x - 4.8791$ | 0.9771 | $y = 1.394x - 0.1772$ |
| R6 | 0.9787 | $y = 1.3685x - 2.8226$ | 0.9513 | $y = 1.4646x + 2.3443$ |
| R7 | 0.9953 | $y = 0.3563x + 7.9227$ | 0.9855 | $y = 0.4258x + 9.8716$ |
| R8 | 0.9958 | $y = 2.8996x - 2.0506$ | 0.9112 | $y = 3.2087x + 0.7201$ |
| R11 | 0.9973 | $y = 0.9791x - 1.3968$ | 0.9913 | $y = 1.1342x + 1.12$ |
| R12 | 0.9892 | $y = 2.7864x - 1.1819$ | 0.9897 | $y = 3.7258x - 5.8605$ |



VALIDACIÓN DEL ALGORITMO

A través de las cámaras del sistema de monitoreo del puente río Papaloapan, se identificó el paso de vehículos C3 en diferentes horarios (Figura 8).

Posteriormente, se analizaron los registros de los sensores de deformación de cada evento aplicando el algoritmo desarrollado. De este modo, a través de la ecuación correspondiente para cada sensor y carril, se obtuvo el peso bruto vehicular de cada evento. En la Tabla 7 se muestran los resultados para el sensor R7 de los PBV correspondientes al paso de vehículos C3 a través del puente. Al verificar los datos de acuerdo con la NOM-12, establece que el peso bruto máximo permitido para vehículos C3 en camino tipo A es de 27.5 t, podemos afirmar que un 10 % de los vehículos C3 analizados presentan sobrecarga.

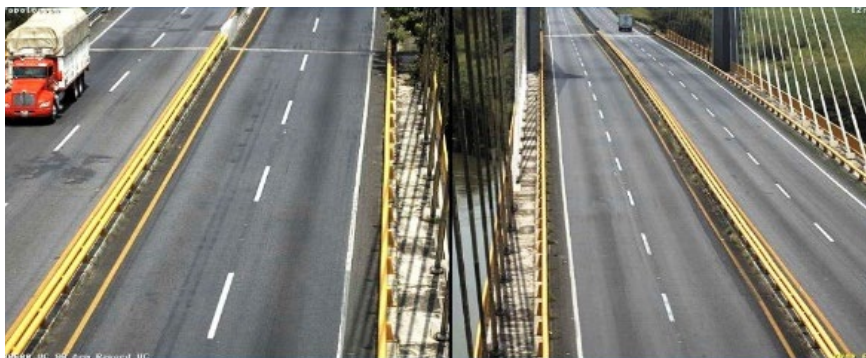


Figura 8. Vehículo C3 circulando en el carril de baja del cuerpo A.

Tabla 7. Resultados del PBV de vehículos C3, obtenidos a través de los registros de deformación del sensor R7.

| CARRIL | R7 (μE) | PBV (T) | SOBRECARGA (T) | SOBRECARGA (%) |
|--------|---------|---------|----------------|----------------|
| Baja | 22.37 | 15.89 | -11.6 | -42% |
| Baja | 53.51 | 26.99 | -0.5 | -2% |
| Baja | 53.51 | 26.99 | -0.5 | -2% |
| Baja | 12.23 | 12.28 | -15.2 | -55% |
| Baja | 22.52 | 15.95 | -11.6 | -42% |
| Baja | 35.13 | 20.44 | -7.1 | -26% |
| Baja | 44.7 | 23.85 | -3.7 | -13% |
| Baja | 119.7 | 50.57 | 23.1 | 84% |
| Alta | 10.16 | 14.20 | -13.3 | -48% |
| Baja | 19.34 | 14.81 | -12.7 | -46% |

CONCLUSIONES

Es viable identificar vehículos con sobrecarga en puentes a través de la implementación de un algoritmo caracterizado por la respuesta dinámica de sensores de deformación unitaria en pruebas controladas, empleando vehículos con configuración C3 que circulan en un mismo cuerpo, en carriles y velocidades diferentes. Además, existe una fuerte correlación entre las deformaciones unitarias máximas a tensión generada por vehículos de autotransporte y el peso bruto vehicular. De hecho, un solo modelo lineal es suficiente para describir tal relación con una precisión de 97 % para los vehículos que circulan en el carril de baja velocidad y 91 % para los que circulan en el de alta velocidad. El análisis para determinar el peso

bruto vehicular se puede realizar en condiciones normales de tráfico, identificando los vehículos C3 a través de las cámaras de video del sistema de monitoreo del puente.

Se ha desarrollado un algoritmo que permite conocer información relevante de los vehículos que circulan los puentes monitoreados a través del IMT con el objetivo de proporcionar a las autoridades un control vial del autotransporte que presenta sobrecarga en México.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por los recursos otorgados a través del programa de PNPC y al Instituto Mexicano del Transporte (IMT) por brindar apoyo, asesoría y

los recursos necesarios para realizar esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] J. A. Quintana Rodríguez, F. Carrión Viramontes, S. E. Crespo Sánchez, A. Hernández Guzmán, D. Rodríguez Naranjo y D. Arceo Mariñelarena, "Efecto de las variaciones del peso máximo de vehículos doblemente articulados en el deterioro de un puente atirantado", *Publicaciones Instituto Mexicano del Transporte*, vol. 399, 2014.
- [2] L. Á. Martínez Trujano, J. A. Quintana Rodríguez, B. Arroyo Ramírez, F. J. Carrión Viramontes, S. E. Crespo Sánchez, J. A. Hernández Figueroa, V. M. Bonilla Ureña, H. M. Gasca Zamora y A. Hernández Guz-



- mán, *Sistema Inteligente y protocolos de actuación para monitoreo remoto de puentes*, I. M. d. Transporte, Ed., Sanfandila, Querétaro: Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2016, pp. 43-46.
- [3] A. Mendoza Díaz, A. Cadena Rodríguez, O. de Buen Richkarday, L. Domínguez Pommerencke y A. Rico Rodríguez, "Análisis estadístico del peso y las dimensiones de los vehículos de carga que circulan por la red nacional de carreteras. Estaciones instaladas durante 1991", *Publicaciones Instituto Mexicano del Transporte*, vol. 8, 1992.
- [4] J. L. M. García, "Efectos de fatiga y extremos en puentes de concreto presforzado ante cargas de vehículos pesados", Querétaro, 2014.
- [5] M. d. J. F. Gallegos, "CENAM", 09 octubre 2018. [En línea]. Recuperado de: <https://www.cenam.mx/cb/Pres/Pesaje%20din%C3%A1mico%20en%20carreteras%20-%20Manuel%20Fabela.pdf>.
- [6] Y. Yu, C. CS y D. Lu, "State-of-the-art review on bridge weigh-in-motion technology", *Sage Journals*, vol. 19, no. 9, 2016.
- [7] J. A. Quintana Rodríguez, F. J. Carrión Viramontes, L. Á. Martínez Trujano, J. A. Hernández Figueroa y H. M. Gasca Zamora, "Monitoreo y evaluación estructural en tiempo real del puente río Papaloapan", *Publicaciones Instituto Mexicano del Transporte*, vol. 592, 2020.
- [8] J. A. Quintana Rodríguez, F. J. Carrión Viramontes, S. E. Crespo Sánchez, D. Rodríguez Naranjo, L. Á. Martínez Trujano, H. M. Gasca Zamora, D. Arceo Mariñelarena, A. Hernández Guzmán y J. Hernández Figueroa, "Estrategias de evaluación y análisis del monitoreo del puente río Papaloapan", Sanfandila, Querétaro, 2015.
- [9] J. P. M. Díaz, "Procesos de Modificación de la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2 Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de auto-transporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal", 2018.
- [10] L. Á. Martínez Trujano, J. A. Quintana Rodríguez, B. Arroyo Ramírez, F. J. Carrión Viramontes, S. E. Crespo Sánchez, J. A. Hernández Figueroa, V. M. Bonilla Ureña, H. M. Gasca Zamora y A. Hernández Guzmán, *Sistema Inteligente y protocolos de actuación para monitoreo remoto de puentes*, I. M. d. Transporte, Ed., Sanfandila, Querétaro: Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2016, pp. 43-46.
- [11] L. Á. Martínez Trujano, M. Anaya, G. Guzmán y V. Varela, "Estudio mediante monitoreo estructural de puentes para la identificación de tránsito: velocidad, dirección y peso bruto vehicular", Sanfandila, 2021.

