



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de ingeniería

Maestría en Ciencias línea terminal estructuras

Identificación de vehículos de autotransporte a través del monitoreo de puentes

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de Maestro en Ciencias  
(Estructuras)

Presenta

Violeta Rodríguez Millán

---

Dirigido por:

Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández

---

Co-dirigido por:

Luís Álvaro Martínez Trujano

---

Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández

Presidente

Luis Álvaro Martínez Trujano

Secretario

Jaime Moisés Horta Rangel

Vocal

Francisco Javier Carrión Viramontes

Suplente

Luis Francisco Pérez Moreno

Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

Febrero de 2024

México



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales  
de Información



Identificación de vehículos de autotransporte a través  
del monitoreo de puentes

**por**

Violeta Rodríguez Millán

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional](#).

**Clave RI:** IGMAC-300610

## Dedicatorias

A Dios, por nunca soltarme de su mano y darme todo lo que tengo.

A mis padres Ramiro Rodríguez Salgado y María de Lourdes Millán Espín, por su amor, sacrificios y apoyo incondicional que me han llevado a culminar este trabajo. Todo lo que hoy soy, es gracias a ellos.

A mi hermano Pablo, por siempre mostrarme el camino hacia la superación y el éxito profesional.

## Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) a través del programa de PNPC y a la Universidad Autónoma de Querétaro por la beca recibida en este periodo de dos años.

Al Instituto Mexicano del Transporte (IMT) por brindar apoyo, asesoría y los recursos necesarios durante la maestría. La investigación que desarrollé fue parte de un proyecto interno del instituto llamado "Monitoreo y evaluación estructural del puente El Carrizo", y gracias al cual esta investigación fue posible.

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mi asesor de tesis Luis Álvaro Martínez Trujano por su instrucción, apoyo y guía durante el desarrollo de esta investigación. Al Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández, le agradezco su tiempo y dedicación para la revisión de éste trabajo.

## Índice

Resumen.....	12
<i>Abstract</i> .....	13
1. Planteamiento del problema .....	14
2. Justificación .....	16
3. Antecedentes.....	20
3.1 Instrumentación del Puente Río Papaloapan .....	21
4. Marco teórico referencial .....	23
4.1 Puentes atirantados .....	23
4.2 Sistema de pesaje en movimiento.....	24
4.3 Sistema Bwim.....	26
4.4 Estudios de la técnica Bwim.....	28
4.5 Sensores de fibra óptica.....	30
4.6 Sensores de rejilla de fibra de Bragg (sensores FBG) .....	31
4.6.1 Características de las rejillas de fibra de Bragg.....	33
4.7 Norma Oficial Mexicana Nom-012-Sct-2-2017, Sobre el Peso y Dimensiones Máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de Jurisdicción Federal .....	34
5. Hipótesis .....	37
6. Objetivos.....	38
6.1 Objetivo general .....	38
6.2 Objetivos específicos .....	38
7. Metodología .....	39

7.1 Definición de tipo de pruebas experimentales y vehículos en el puente Río Papaloapan.....	40
7.2 Desarrollo del plan y estrategia para la evaluación de la información del sistema de monitoreo en pruebas experimentales controladas y no controladas sobre el puente Río Papaloapan con vehículos de autotransporte. ....	41
7.3 Identificación de variables estructurales sensibles a la configuración vehicular. ....	43
7.4 Diseño y desarrollo de un algoritmo para identificar la configuración vehicular y clasificación del vehículo autotransporte que transita sobre el puente.....	44
7.5 Desarrollo de un modelo de elemento finito (MEF) para análisis o simulación de efectos de carga viva, así como respuestas dinámicas. ....	45
8. Resultados y Discusión.....	48
8.1 Implementación del algoritmo .....	48
8.1.1 Señales de deformación unitaria .....	48
8.1.2 Amplitudes máximas.....	66
8.1.3 Determinación de velocidad.....	76
8.1.4 Modelo matemático .....	85
8.2 Validación del algoritmo .....	86
8.2.1 Identificación de vehículos con sobrepeso .....	86
8.2.2 Identificación de configuración vehicular a partir del modelo matemático .....	87
9. Conclusiones .....	99
10. Bibliografía o Referencias.....	101
Anexos.....	106

## Índice de tablas

Tabla 1 Pesos máximos autorizados por tipo de eje y camino. ....	35
Tabla 2 Peso bruto vehicular autorizado por clase de vehículo y camino. ....	36
Tabla 3 Descripción de pruebas experimentales controladas y los vehículos de autotransporte utilizados. ....	42
Tabla 4 Peso bruto vehicular de vehículos de autotransporte de configuración vehicular C3. ....	43
Tabla 5 Peso bruto vehicular de vehículos de autotransporte de configuración vehicular T3S2. ....	43
Tabla 6 Deformación por carga viva para carril de baja velocidad, sensor R1. ....	67
Tabla 7 Deformación por carga viva para carril de alta velocidad, sensor R1. ....	67
Tabla 8 Deformación por carga viva para carril de baja velocidad, sensor R2. ....	68
Tabla 9 Deformación por carga viva para carril de alta velocidad, sensor R2. ....	68
Tabla 10 Deformación por carga viva para carril de baja velocidad, sensor R4. ....	69
Tabla 11 Deformación por carga viva para carril de alta velocidad, sensor R4. ....	69
Tabla 12 Deformación por carga viva para carril de baja velocidad, sensor R5. ....	70
Tabla 13 Deformación por carga viva para carril de alta velocidad, sensor R5. ....	70
Tabla 14 Deformación por carga viva para carril de baja velocidad, sensor R6. ....	71
Tabla 15 Deformación por carga viva para carril de alta velocidad, sensor R6. ....	71
Tabla 16 Deformación por carga viva para carril de baja velocidad, sensor R7. ....	72
Tabla 17 Deformación por carga viva para carril de alta velocidad, sensor R7. ....	72
Tabla 18 Deformación por carga viva para carril de baja velocidad, sensor R8. ....	73
Tabla 19 Deformación por carga viva para carril de alta velocidad, sensor R8. ....	73
Tabla 20 Deformación por carga viva para carril de baja velocidad, sensor R11. ....	74
Tabla 21 Deformación por carga viva para carril de alta velocidad, sensor R11. ....	74
Tabla 22 Deformación por carga viva para carril de baja velocidad, sensor R12. ....	75
Tabla 23 Deformación por carga viva para carril de alta velocidad, sensor R12. ....	75
Tabla 24 Determinación de velocidad – DIN1- Primer evento. ....	76
Tabla 25 Determinación de velocidad – DIN1- Segundo evento. ....	77
Tabla 26 Determinación de velocidad – DIN1- Tercer evento. ....	77

Tabla 27 Determinación de velocidad – DIN1- Cuarto evento. ....	78
Tabla 28 Determinación de velocidad – DIN2- Primer evento. ....	78
Tabla 29 Determinación de velocidad – DIN2- Segundo evento. ....	79
Tabla 30 Determinación de velocidad – DIN2- Tercer evento. ....	79
Tabla 31 Determinación de velocidad – DIN2- Cuarto evento. ....	80
Tabla 32 Determinación de velocidad – DIN3- Primer evento. ....	80
Tabla 33 Determinación de velocidad – DIN3- Segundo evento. ....	81
Tabla 34 Determinación de velocidad – DIN3- Tercer evento. ....	81
Tabla 35 Determinación de velocidad – DIN3- Cuarto evento. ....	82
Tabla 36 Determinación de velocidad – DIN4- Primer evento. ....	83
Tabla 37 Determinación de velocidad – DIN4- Segundo evento. ....	83
Tabla 38 Determinación de velocidad – DIN4- Tercer evento. ....	84
Tabla 39 Determinación de velocidad – DIN4- Cuarto evento. ....	84
Tabla 40 Coeficiente R2 y ecuación para estimar el peso bruto vehicular (PBV) para cada sensor en carril de alta y baja velocidad. ....	86
Tabla 41 Resultados del PBV de vehículos C3, obtenidos a través de los registros de deformación del sensor R7. ....	87
Tabla 42 Ecuaciones de regresión lineal para configuración C3 – Registro de pruebas dinámicas. ....	88
Tabla 43 Ecuaciones de regresión lineal para configuración C3 – Modelo SAP2000. ....	88
Tabla 44 Ecuaciones de regresión lineal para configuración T3S2 – Modelo SAP2000. ....	89
Tabla 45 Coeficiente de determinación R2 para vehículos C3 vs Modelo C3 Pruebas dinámicas. ....	89
Tabla 46 Coeficiente de determinación R2 para vehículos C3 vs Modelo SAP 2000 C3 Pruebas dinámicas. ....	90
Tabla 47 Coeficiente de determinación R2 para vehículos C3 vs Modelo SAP 2000 T3S2. ....	90

Tabla 48 Coeficiente de determinación R2 para vehículos T3S2 vs Modelo C3 Pruebas dinámicas. ....	94
Tabla 49 Coeficiente de determinación R2 para vehículos T3S2 vs Modelo SAP 2000 C3 Pruebas dinámicas. ....	94
Tabla 50 Coeficiente de determinación R2 para vehículos T3S2 vs Modelo SAP 2000 T3S2. ....	95

## Índice de Figuras

Figura 1 Puente Río Papaloapan, [11].	18
Figura 2 Ubicación de sensores de deformación en el puente Río Papaloapan [6].	22
Figura 3 Puente Riddes en Suiza. Es una estructura atirantada con un sistema de suspensión en tres planos [14].	24
Figura 4 Sistema de medición de pesaje en movimiento.	26
Figura 5 Luz reflejada y transmitida en rejilla de fibra de Bragg [24]	32
Figura 6 Diagrama esquemático del sistema de fibra de Bragg [24].	33
Figura 7 Metodología para la identificación vehicular.	39
Figura 8 Vehículo de autotransporte de configuración vehicular C3 [9].	40
Figura 9 Vehículo de autotransporte de configuración vehicular T3S2 [9].	41
Figura 10 Modelo de elemento finito del puente Río Papaloapan.	46
Figura 11 Prueba DIN1, sensor R1	48
Figura 12 Prueba DIN1, sensor R2	49
Figura 13 Prueba DIN1, sensor R4	49
Figura 14 Prueba DIN1, sensor R5	50
Figura 15 Prueba DIN1, sensor R6	50
Figura 16 Prueba DIN1, sensor R7	51
Figura 17 Prueba DIN1, sensor R8	51
Figura 18 Prueba DIN1, sensor R11	52
Figura 19 Prueba DIN1, sensor R12	52
Figura 20 Prueba DIN2, sensor R1	53
Figura 21 Prueba DIN2, sensor R2	53
Figura 22 Prueba DIN2, sensor R4	54
Figura 23 Prueba DIN2, sensor R5	54
Figura 24 Prueba DIN2, sensor R6	55
Figura 25 Prueba DIN2, sensor R7	55
Figura 26 Prueba DIN2, sensor R8	56

Figura 27 Prueba DIN2, sensor R1.....	56
Figura 28 Prueba DIN2, sensor R2.....	57
Figura 29 Prueba DIN3, sensor R1.....	57
Figura 30 Prueba DIN3, sensor R2.....	58
Figura 31 Prueba DIN3, sensor R4.....	58
Figura 32 Prueba DIN3, sensor R5.....	59
Figura 33 Prueba DIN3, sensor R6.....	59
Figura 34 Prueba DIN3, sensor R7.....	60
Figura 35 Prueba DIN3, sensor R8.....	60
Figura 36 Prueba DIN3, sensor R11.....	61
Figura 37 Prueba DIN3, sensor R12.....	61
Figura 38 Prueba DIN4, sensor R1.....	62
Figura 39 Prueba DIN4, sensor R2.....	62
Figura 40 Prueba DIN4, sensor R4.....	63
Figura 41 Prueba DIN4, sensor R5.....	63
Figura 42 Prueba DIN4, sensor R6.....	64
Figura 43 Prueba DIN4, sensor R7.....	64
Figura 44 Prueba DIN4, sensor R8.....	65
Figura 45 Prueba DIN4, sensor R11.....	65
Figura 46 Prueba DIN4, sensor R12.....	66
Figura 47 Vehículo C3 circulando en el carril de baja del cuerpo A.....	86
Figura 48 Evaluación de modelos: Vehículos C3 - Extensómetro R1.....	90
Figura 49 Evaluación de modelos: Vehículos C3 - Extensómetro R2.....	91
Figura 50 Evaluación de modelos: Vehículos C3 - Extensómetro R4.....	91
Figura 51 Evaluación de modelos: Vehículos C3 - Extensómetro R5.....	92
Figura 52 Evaluación de modelos: Vehículos C3 - Extensómetro R6.....	92
Figura 53 Evaluación de modelos: Vehículos C3 - Extensómetro R7.....	93
Figura 54 Evaluación de modelos: Vehículos C3 - Extensómetro R8.....	93
Figura 55 Evaluación de modelos: Vehículos T3S2 - Extensómetro R1.....	95
Figura 56 Evaluación de modelos: Vehículos T3S2 - Extensómetro R2.....	96

Figura 57 Evaluación de modelos: Vehículos T3S2 - Extensómetro R4.....	96
Figura 58 Evaluación de modelos: Vehículos T3S2 - Extensómetro R5.....	97
Figura 59 Evaluación de modelos: Vehículos T3S2 - Extensómetro R6.....	97
Figura 60 Evaluación de modelos: Vehículos T3S2 - Extensómetro R7.....	98
Figura 61 Evaluación de modelos: Vehículos T3S2 - Extensómetro R8.....	98

## Resumen

Este estudio presenta una metodología para la identificación y clasificación de vehículos de autotransporte mediante el monitoreo de salud estructural (SHM) y el desarrollo de un nuevo algoritmo. El objetivo principal de este algoritmo es reconocer vehículos con sobrecarga, los cuales pueden ocasionar degradación prematura por fatiga en los elementos estructurales del Puente Río Papaloapan, ubicado en Veracruz, México. Al utilizar datos reales del sistema de monitoreo y realizar pruebas experimentales controladas y no controladas sobre el puente, es posible identificar las variables estructurales correlacionadas con las respuestas dinámicas y el peso bruto vehicular.

La metodología facilita la identificación del peso bruto vehicular en condiciones normales de tráfico mediante las cámaras de video del sistema de monitoreo del puente. Además, logra la identificación del carril por donde circula el vehículo a través del cociente de deformación obtenido de los extensómetros ubicados en los cuerpos A y B del puente. La comparación de las deformaciones obtenidas del modelo de elemento finito con las pruebas experimentales resulta en un modelo ideal ajustado a los datos reales para vehículos C3 y T3S2. Sin embargo, se destaca la necesidad de mejorar el modelo matemático para discriminar entre las configuraciones C3 y T3S2.

En resumen, este estudio desarrolla una metodología integral que utiliza el monitoreo de salud estructural (SHM) y un nuevo algoritmo para identificar vehículos con sobrecarga en el Puente Río Papaloapan. Ofrece información valiosa para mejorar el control vial del autotransporte en México, garantizando la integridad estructural de las infraestructuras y contribuyendo a la seguridad y eficiencia del transporte.

Palabras clave: monitoreo de salud estructural, puente Río Papaloapan, sobrecarga, deformación unitaria, peso bruto vehicular.

## **Abstract**

*This study presents a methodology for the identification and classification of commercial transport vehicles through Structural Health Monitoring (SHM) and the development of a new algorithm. The main objective of this algorithm is to recognize overloaded vehicles, which can cause premature degradation due to fatigue in the structural elements of the Río Papaloapan Bridge, located in Veracruz, Mexico. By using real data from the monitoring system and conducting controlled and uncontrolled experimental tests on the bridge, it is possible to identify the structural variables correlated with dynamic responses and gross vehicle weight.*

*The methodology enables the identification of gross vehicle weight under normal traffic conditions using video cameras from the bridge's monitoring system. Furthermore, it achieves the identification of the lane where the vehicle is traveling through the strain quotient obtained from the strain gauges located on the A and B sections of the bridge. Comparing the deformations obtained from the finite element model with experimental tests results in an ideal model adjusted to real data for C3 and T3S2 vehicles. However, there is a highlighted need to improve the mathematical model to differentiate between C3 and T3S2 configurations.*

*In summary, this study develops a comprehensive methodology that utilizes Structural Health Monitoring (SHM) and a new algorithm to identify overloaded vehicles on the Río Papaloapan Bridge. It provides valuable information to enhance traffic control for commercial transport in Mexico, ensuring the structural integrity of infrastructures, and contributing to the safety and efficiency of transportation.*

*Keywords: structural health monitoring, Río Papaloapan bridge, overload, strain, gross vehicle weight.*

## 1. Planteamiento del problema

De acuerdo con estudios de campo de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes efectuados por el Instituto Mexicano del Transporte, se ha determinado que el 18% del total de los vehículos de carga circulan con sobrecarga. En el caso particular del puente Río Papaloapan, se encuentra que, tomando como referencia el límite de 66.5 toneladas para el 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].

La mayoría de los efectos dinámicos en la estructura son provocados por el tránsito de vehículos, aunque las cargas estáticas y las cargas causadas por efectos térmicos también aportan información valiosa [2].

En relación con los pesos brutos máximos (PBVs máximos) actualmente autorizados para los vehículos de autotransporte, una situación que no debe prevalecer es la aplicación de la estrategia "pocos viajes con mucha carga" de la manera como actualmente ocurre en México: los vehículos de carga circulan con elevados niveles de sobrepeso, lo cual además de que es antirreglamentario, acelera considerablemente el deterioro de la infraestructura carretera. Los niveles de violación a la reglamentación en México sobre pesos y dimensiones hacen que muchos de los criterios y procedimientos norteamericanos frecuentemente utilizados en el cálculo de capacidades y el diseño de carreteras interurbanas y suburbanas, no sean directamente aplicables para México [3]

Los vehículos con exceso de peso pueden causar daños severos e incrementar el deterioro de la infraestructura de transporte [4].

La detección y control de vehículos de autotransporte que circulan por el puente Río Papaloapan se ha convertido en un problema debido a que con el tráfico constante de este tipo de vehículos provoca fatiga en los elementos estructurales por sobrecarga, lo cual reduce significativamente el tiempo de vida de servicio de la

estructura al exceder la capacidad de carga del puente y provocar una falla estructural en situaciones más críticas.

El puente Río Papaloapan es el primer puente instrumentado, monitoreado en tiempo real y evaluado de forma permanente por el Centro de Monitoreo de Puentes y Estructuras Inteligentes de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes [5].

El algoritmo empleado actualmente es capaz de identificar únicamente dirección, velocidad y peso bruto vehicular, este último obtenido a través de datos estadísticos) utilizando un único sensor de deformación, en el escenario donde sólo circula un vehículo en el carril de baja velocidad del puente [6]. Por lo que, se requieren realizar pruebas experimentales en la estructura mediante diversos pesajes para correlacionar el PBV de los vehículos de autotransporte con las respuestas del sistema de monitoreo del puente, para finalmente implementar un algoritmo capaz de identificar y clasificar el tipo de vehículo que está circulando sobre el puente, así como si presenta sobrecarga, basado en la NOM-012.

## 2. Justificación

La detección y seguimiento de los daños para estimar el deterioro de los elementos estructurales en infraestructura civil es de suma importancia, ya que, los vehículos de carga con exceso de peso, debido al tránsito continuo, pueden causar daños severos e incrementar el deterioro de la infraestructura de transporte.

En todo el mundo, la historia de los puentes ha sido testigo de desastres devastadores que se originan por una variedad de causas. Estos desafíos pueden surgir tanto de fenómenos naturales impredecibles como de otros factores que incluyen el exceso de peso en las estructuras, diseños deficientes en los elementos estructurales, procesos constructivos inadecuados y el uso de materiales de baja calidad. Estos eventos trágicos han dejado una huella significativa en la seguridad y la confianza en la construcción de puentes a lo largo de los años. Es esencial aprender de estos desastres para mejorar la planificación, el diseño y la construcción de puentes en el futuro, con el objetivo de garantizar la seguridad y la integridad de estas importantes estructuras que conectan comunidades y facilitan el transporte en todo el mundo.

El 14 de agosto de 2018, en la ciudad de Génova, Italia, el desplome del puente de Morandi sobre un tramo de 220 metros, provocó la muerte de 43 personas. El 21 de marzo de 2001, el puente portugués que se eleva sobre el río Duero colapsó y alrededor de 70 personas cayeron al vacío. En Estados Unidos, el 1 de agosto de 2007, en la ciudad de Minneapolis, un puente sobre el río Mississippi, que formaba parte de una autopista interestatal se derrumbó durante trabajos de reparación provocando la muerte de al menos 9 personas [7].

En nuestro país, hemos sido testigos de uno de los accidentes más recientes: el colapso de la Línea 12 del metro de Ciudad de México el 3 de mayo de 2021. Este trágico suceso fue causado por un fallo en la estructura debido a deficiencias en el

proceso de construcción, con consecuencias devastadoras: la pérdida de la vida de 26 personas y numerosos heridos. [8].

Los parámetros de sobrepeso y dimensiones de vehículos de autotransporte se fundamentan en la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017. Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal la cual, establece las especificaciones de peso, dimensiones y capacidad de los vehículos de autotransporte federal, sus servicios auxiliares y transporte privado que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal [9].

La NOM-012 responde a la necesidad imperante de garantizar la seguridad durante el transporte de carga en las vías de comunicación, asegurándose de que el peso y las dimensiones de la carga no pongan en peligro la integridad de las personas ni dañen la infraestructura vial. Esta normativa establece medidas y protocolos para supervisar y regular de manera rigurosa las condiciones en las que se realiza el traslado de mercancías, promoviendo prácticas seguras y responsables en la industria del transporte. Al enfocarse en la protección de la vida humana y la preservación de las carreteras, la NOM-012 contribuye a prevenir accidentes, minimizar los impactos negativos en la infraestructura y fomentar una movilidad eficiente y sostenible en nuestro país. La implementación de la NOM-012 ha tenido un impacto significativo en la reducción de accidentes relacionados con el exceso de peso y/o dimensiones de los vehículos en circulación. Esta normativa ha contribuido a garantizar que los vehículos operen dentro de los límites seguros establecidos, evitando situaciones de sobrecarga que podrían comprometer la integridad de las personas y la infraestructura vial. Además de la seguridad, la NOM-012 también ha desempeñado un papel clave en la preservación y el mantenimiento adecuado de la infraestructura carretera. Al regular el tránsito de vehículos sobrecargados, se ha logrado mitigar el deterioro acelerado de las carreteras, prolongando su vida útil y reduciendo los costos asociados con reparaciones y

reconstrucciones frecuentes. Esto ha permitido destinar recursos de manera más eficiente en la planificación y mejora de la red vial en su conjunto. [10].

El puente Río Papaloapan construido en 1994, es una estructura de tipo atirantado, que se encuentra en el Estado de Veracruz, México (Figura 1). Tiene una longitud total de 407 metros, un claro principal de 203 metros, 8 semi-arpas con 14 cables cada una, y en 2019 reportó un Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA) de 5069 vehículos [6].



Figura 1 Puente Río Papaloapan, [11].

Al día de hoy, se han presentado dos fallas estructurales importantes en los elementos de anclaje superior. El primer accidente ocurrió en enero de 2000, cuando el tirante T11S7 (correspondiente al tirante 11 de la semi-arpa 7) colapsó debido a deficiencias microestructurales en el acero usado para su elemento de anclaje superior, siendo los tirantes y los elementos de anclaje, elementos estructurales considerados como críticos. La segunda falla ocurrió el 10 de junio de 2015. En este caso, tuvo lugar en la interfaz de soldadura entre el elemento de anclaje y la placa de acero del tirante T1S5 (correspondiente al tirante 1 de la semi-arpa 5). A partir de que ocurrió la primera falla del puente, se instaló un sistema de monitoreo estructural de alcance completo, siendo el primer puente atirantado en

México con un sistema de monitoreo basado en sensores de fibra óptica tipo FBG (Fiber Bragg Grating) de alcance remoto [12].

El monitoreo de salud estructural (SHM), es una herramienta fundamental para garantizar la integridad y seguridad de los puentes. En el caso del puente Río Papaloapan, se ha implementado un sistema de monitoreo que utiliza diversos algoritmos, destacando en particular la detección de carga viva generada por el tránsito vehicular. Este algoritmo permite identificar las deformaciones causadas por las tensiones y compresiones diarias, así como eventos extraordinarios generados por vehículos de autotransporte que podrían estar sobrecargados. Además, gestiona información relevante en tiempo real para crear una base de información histórica, a través de datos estadísticos, y detectar en cualquier instante de tiempo algún evento o tendencia inusual en los parámetros estructurales monitoreados.

Por lo anterior, se propondrá una metodología para la identificación y clasificación de vehículos de autotransporte mediante el monitoreo de salud estructural (SHM), el cual tendrá como principal objetivo reconocer vehículos con sobrecarga, los cuales pueden provocar degradación prematura por fatiga en los elementos estructurales.

### **3. Antecedentes**

Mediante investigación realizada por el Instituto Mexicano del Transporte en el 2020 cuyo trabajo se titula “Medición de la velocidad y el peso bruto de vehículos de carga a partir del monitoreo en puentes” [13], se puede decir que los aspectos más importantes fueron los siguientes:

Mediante la aplicación de la estrategia propuesta en el estudio, se logró obtener información crucial sobre la velocidad, dirección y peso bruto vehicular (PBV) de los vehículos que transitan por el puente atirantado Río Papaloapan. Esto fue posible gracias a la instalación de extensómetros en la estructura del puente. La elección adecuada del tipo de sensor de deformación, su ubicación estratégica en el puente y la implementación de un algoritmo permitieron identificar con precisión la dirección, velocidad y peso bruto de los vehículos de autotransporte que transitan por el puente. Estos datos son importantes ya que con ello se puede proporcionar a las autoridades, información sobre un mejor control vial de los vehículos con sobrecarga.

El algoritmo se desarrolló y evaluó con los datos históricos del sistema de monitoreo registrados en el año 2017. Inicialmente, se llevó a cabo una búsqueda de archivos que cumplieran el criterio de registrar el tránsito de un vehículo de carga sobre el puente. El objetivo era establecer una correlación entre las respuestas dinámicas captadas por los sensores de deformación y los parámetros relacionados con la identificación del tráfico en el puente, con el fin de determinar la dirección, velocidad y peso bruto vehicular utilizando únicamente un sensor de deformación. Esta investigación se centró en un escenario específico en el cual solo circula un vehículo en el carril de baja velocidad.

En caso de realizar modificaciones en los parámetros estructurales del puente, especialmente en las áreas donde se encuentran los extensómetros, es fundamental llevar a cabo una nueva caracterización de la respuesta dinámica ante la carga viva. Esto permitirá identificar nuevamente la dirección, velocidad y peso bruto vehicular de manera precisa. Es importante recalibrar y evaluar la respuesta del puente ante estos cambios para asegurar una correcta interpretación de los datos y garantizar la fiabilidad de los resultados obtenidos.

En futuros estudios, se recomienda realizar pruebas controladas utilizando vehículos con diversas configuraciones circulando en diferentes carriles y velocidades, para identificar el tipo de vehículo que está circulando sobre el puente. Para determinar el carril en el que circula el vehículo a través de los factores de distribución de carga en las vigas del puente, se recomienda instalar dos sensores de deformación, uno en cada cuerpo, en la misma posición longitudinal en las vigas. Para mejorar la precisión en los valores del PBV y la velocidad de tránsito se debe realizar un estudio para compensar los cambios por efectos térmicos en el puente [13].

### **3.1 Instrumentación del Puente Río Papaloapan**

La instrumentación permanente del puente está conformada por sensores de fibra óptica distribuidos en todo el puente. De los 62 sensores, 24 son extensómetros para concreto, otros 24 son sensores de aceleración, 8 medidores de inclinación, 5 sensores de temperatura y un sensor de desplazamiento. Adicionalmente, el sistema cuenta con dos cámaras de video [2].

La distribución de los sensores es la siguiente: Los sensores están instalados para analizar la dinámica del tablero del puente y de las torres tipo H (dos torres independientes). De esta manera, se ubican 10 sensores de deformación debajo de cada una de las dos vigas principales del tablero del puente, y un sensor en el costado, a media altura de cada torre (Figura 2). En lo alto de cada una de las cuatro

torres se ubican 2 medidores de inclinación y 2 acelerómetros. Los otros 16 acelerómetros se encuentran al centro de la longitud de los cables 4 y 11 de cada semi-arpa.

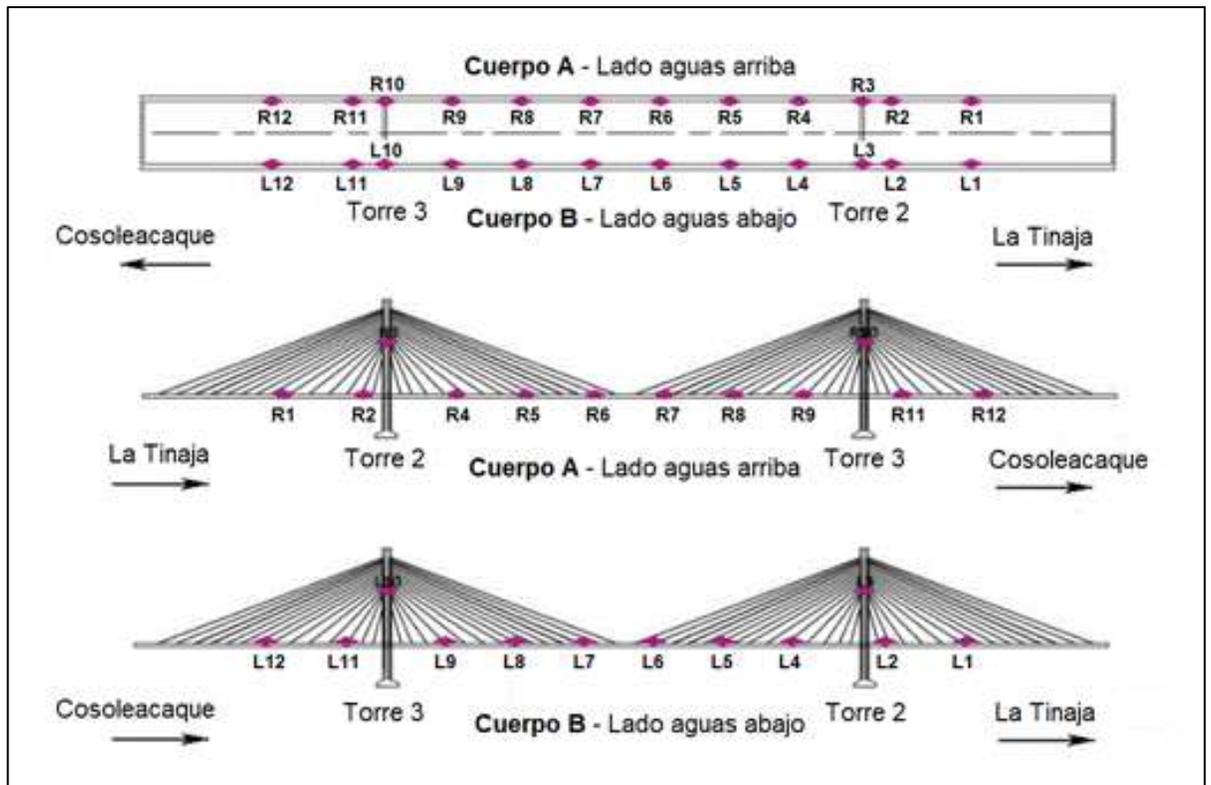


Figura 2 Ubicación de sensores de deformación en el puente Río Papaloapan [6].

## **4. Marco teórico referencial**

### **4.1 Puentes atirantados**

Los puentes atirantados surgieron a finales del siglo XX, presentando un avance significativo en diseño y tecnología. Estos puentes destacaban por su capacidad para abarcar mayores claros y alturas, además de exhibir una estética y versatilidad arquitectónica impresionantes. Un hito importante en la historia de los puentes atirantados fue la construcción del primer puente en Cassagne, Francia, en 1989. A partir de mediados del siglo XX, se empezaron a utilizar cables como sistema de atirantamiento en puentes trazados tanto en Alemania como en diversas partes de Europa. Con el tiempo, estos diseños se implementaron en Estados Unidos y se expandieron alrededor del mundo. [14].

Los puentes atirantados están compuestos por tres elementos esenciales: el tablero, los cables o tirantes y las pilas. Estas estructuras son capaces de abarcar claros que varían típicamente entre 100 y 500 metros. Sin embargo, gracias a los avances tecnológicos actuales, se han logrado diseñar puentes atirantados con claros aún mayores, superando los 800 metros. Ejemplos notables incluyen el puente Tatara en Japón, con un claro impresionante de 890 metros, y el puente Pont de Normandie en Francia, que abarca un claro de 856 metros. [14].

En este tipo de estructuras, las cargas se distribuyen de distintas formas a través de los diferentes tirantes y columnas (Figura 3). En situaciones extremas contempladas en el diseño de puentes atirantados, se presentan dos escenarios principales. En el primero, el tablero del puente se construye con una resistencia estructural suficiente para soportar la mayor parte de la carga, mientras que las pilas tienen una capacidad más limitada y hay pocos tirantes. Por otro lado, en el segundo escenario, la pila y los cables son los componentes que soportan la mayor parte de la carga, ya que el tablero tiene una capacidad de carga reducida. [14].



Figura 3 Puente Riddes en Suiza. Es una estructura atirantada con un sistema de suspensión en tres planos [14].

#### **4.2 Sistema de pesaje en movimiento**

La sobrecarga de vehículos es un problema común, se presenta en camiones o vehículos con sobrepeso. Cuando estos vehículos circulan por las vías de transporte, pueden causar daños significativos en la estructura y acelerar la degradación de la infraestructura en general. En el caso específico de los puentes, el problema más relevante asociado a esta sobrecarga es la fatiga, ya que provoca una disminución en la vida útil de la estructura. La fatiga es un fenómeno que debilita gradualmente los materiales y componentes del puente debido al estrés repetido generado por los vehículos sobrecargados. Por lo tanto, es crucial abordar y controlar adecuadamente la sobrecarga de vehículos para garantizar la integridad y durabilidad de los puentes.

Los métodos más comunes para pesaje de vehículos son la técnica de pesaje estático y pesaje en movimiento conocido por sus siglas en inglés WIM (Weight-In-

Motion), estos últimos sistemas utilizan dispositivos instalados en el camino para pesar los vehículos en condiciones normales de tráfico. Estos sistemas incluyen placas a flexión, celdas de carga y sensores de tira.

La tecnología del pesaje en movimiento surgió entre los años 1960 y 1970, siendo hasta 1980 cuando las administraciones de carreteras empezaron a utilizarlo de una forma generalizada.

El pesaje de vehículos en movimiento o pesaje dinámico, está definido por la American Society for Testing and Materials (ASTM E1318-02) como el proceso mediante el cual se realiza la medición de las fuerzas dinámicas de los neumáticos de un vehículo de autotransporte en movimiento y estimación de las correspondientes cargas por neumático del vehículo estático [15].

Las tecnologías más comunes de pesaje en movimiento son:

- 1. Sensores piezoeléctricos: piezocerámicos, piezopolímeros y cristal de cuarzo.*
- 2. Placas de flexión.*
- 3. Esteras capacitativas*
- 4. BWIM (Bridge-WIM): Puentes de carretera que cuentan con tableros instrumentados en la parte inferior con bandas extensométricas para medir su deformación al paso de los vehículos.*

La estructura de un sistema de pesaje en movimiento se compone de: sensores de peso, lazos de inducción o detectores de presencia con los que se puede medir la velocidad y longitud del vehículo de autotransporte y un aparato electrónico de control del sistema (Figura 4), el cual tiene por objetivo procesar las respuestas dinámicas enviadas por los sensores y detectores colocados [16].

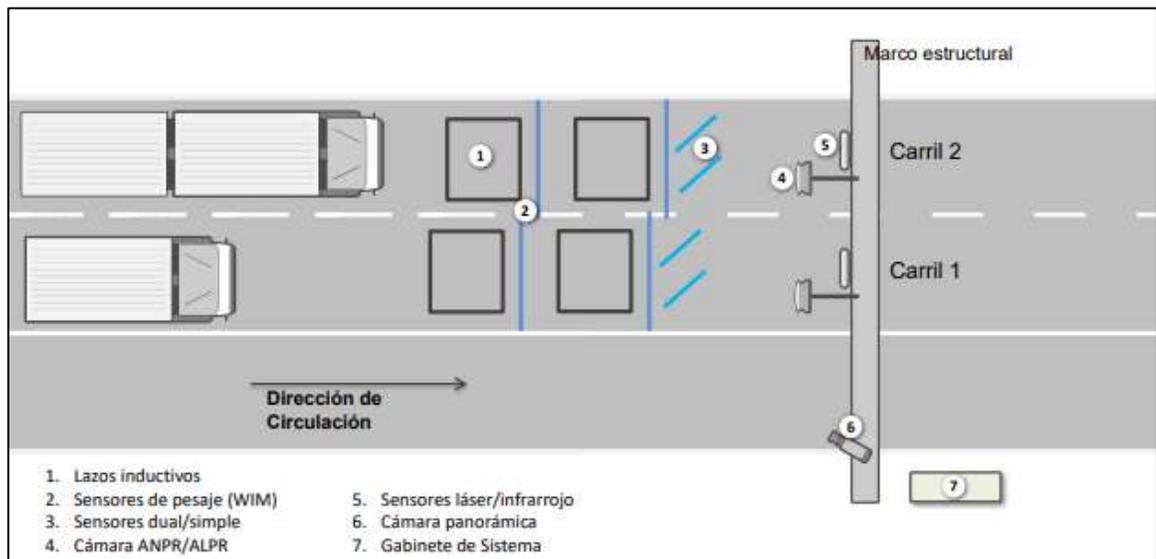


Figura 4 Sistema de medición de pesaje en movimiento.

Moisés propuso por primera vez el concepto de pesaje en movimiento para puentes BWIM (Bridge Weight-In-Motion). A diferencia de la técnica WIM, utiliza un puente instrumentado como balanza para estimar los pesos de los vehículos. El algoritmo de Moses predice el peso y el eje minimizando la diferencia entre la respuesta del puente que se calcula utilizando los conceptos de líneas de influencia [17].

### 4.3 Sistema Bwim

El sistema de pesaje en movimiento en puentes BWIM es una metodología que permite realizar el pesaje de los vehículos sin interrumpir el flujo del tráfico. Este sistema tiene la capacidad de determinar el peso por eje o lado de eje de los vehículos de autotransporte, al tiempo que puede medir otros parámetros de operación relevantes. De esta manera, no es necesario detener cada vehículo individualmente para realizar el pesaje, lo que agiliza el flujo vehicular y mejora la eficiencia del proceso de control de peso en los puentes. [18].

Los sistemas BWIM presentan varias ventajas en comparación con los sistemas WIM. En primer lugar, la tecnología BWIM tiende a ser más duradera debido a que la mayoría de los sensores se instalan debajo del puente. Además, estos sistemas

son fáciles y seguros de utilizar, ya que permiten realizar las mediciones sin interrumpir el tráfico. En términos de precisión, los sistemas BWIM suelen ser más exactos que los sistemas WIM. La instrumentación de un sistema BWIM consta de diversos componentes, como un sistema de adquisición de datos, un sistema de comunicación, un suministro de energía y los propios sensores. Una vez instalado, el sistema BWIM procesa los datos mediante software que utiliza algoritmos específicos para este propósito. Los resultados se presentan en una interfaz gráfica de usuario (GUI) diseñada para mostrar los datos de monitoreo en tiempo real. En un sistema BWIM, los sensores se dividen en dos categorías: los sensores de pesaje y los sensores de detección de ejes.

Los parámetros de medición son los siguientes:

1. *Peso: Total, por eje o por rueda.*
2. *Ejes: Número o grupos.*
3. *Arreglo de llantas: Dual o sencilla.*
4. *Dimensiones: Largo, alto, ancho.*
5. *Operación: Velocidad, carril y sentido de flujo.*
6. *Identificación: Placa (ANPR, ALPR)*
7. *Comunicación: Almacenamiento y base de datos.*

Es crucial garantizar la precisión de las mediciones y la confiabilidad del sistema al considerar la respuesta a la tensión y la elección de los sensores de deformación adecuados. Para lograr la detección de ejes, se utilizan instrumentos como interruptores de cinta y tubos neumáticos. Estos dispositivos desempeñan un papel fundamental al identificar y registrar los ejes en el sistema de pesaje en movimiento, lo que contribuye a obtener datos precisos y confiables durante el proceso de medición. En un sistema BWIM, los sensores de pesaje se utilizan para medir las respuestas de esfuerzos a tensión de manera global en el puente.

Los algoritmos BWIM estáticos incluyen el algoritmo de Moses, el método de área de influencia, el método de la fuerza de reacción y el ortotrópico algoritmo BWIM [17].

#### **4.4 Estudios de la técnica Bwim**

Los estudios de la técnica BWIM se enfocan en derivación teórica y calibración basada en pruebas de campo. El método empleado tiene dos pasos: el primero la línea de influencia de la deformación del objetivo se obtiene teóricamente con el método cinemático para después disponer de un vehículo con peso conocido que cruce el puente instrumentado varias veces para las pruebas de calibración. Los datos de deformación medidos en las pruebas se utilizan para determinar el valor de la línea de influencia. Una vez que se obtienen el componente estático de la deformación inducida por el vehículo y la línea de influencia de la deformación calibrada, la línea de influencia teórica inversa se puede utilizar para calcular el peso bruto. El uso de datos de deformación recopilados por un solo sensor de deformación es suficiente para determinar el peso bruto de ese vehículo.

El algoritmo de regresión (con sus siglas en inglés LOWESS) se utiliza para extraer el componente estático de la respuesta de tensión del puente dada por los vehículos. Después a través de pruebas de campo de calibración se obtiene el tráfico de la línea de influencia del carril del puente con la tensión estática inducida por los vehículos.

Las líneas de influencia calibradas revelan directamente el valor cuantitativo de la relación del peso bruto y los datos de deformación recopilados por los diferentes sensores de deformación.

Esta técnica es eficiente frente a escenarios de tráfico tanto simple como complejo. En el escenario de vehículos en configuración “uno por uno” se simplifica similar al escenario de un solo vehículo y el peso bruto del vehículo se calcula utilizando una ecuación con el pico correspondiente de la señal de deformación. Para el escenario de vehículos en configuración “lado a lado” se utiliza el método de mínimos

cuadrados para resolver el problema de variación en los resultados del peso bruto del vehículo dados por dos sensores de deformación.

Los resultados de reconocimiento del PBV tienen precisión aceptable cuando se utilizan datos de menos de ocho sensores de deformación. Se sugiere que se instalen sensores de deformación lejos del eje neutro de las secciones transversales para una mayor precisión.

La técnica de visión por computadora hace que sea factible ubicar los vehículos en cada cuadro de video, así como su trayectoria. Esta técnica es esencial para la solución del problema de múltiples vehículos. Con ello se extraen los parámetros clave de video de tráfico en tiempo real como la posición, el tamaño y número de ejes [19].

La identificación y clasificación de vehículos en el monitoreo de puentes se lleva a cabo mediante un algoritmo diseñado específicamente para este propósito. Este algoritmo utiliza datos de respuesta de aceleración del puente durante el paso de vehículos y realiza un conteo automático de los mismos.

La detección automática de vehículos se logra mediante el modelado de las vibraciones generadas por los vehículos, teniendo en cuenta parámetros físicos como el peso bruto, la velocidad y la longitud de estos. Este enfoque permite una identificación precisa y una clasificación eficiente de los vehículos que transitan el puente durante el monitoreo.

Los parámetros de ajuste del algoritmo de detección automática de vehículos, son el umbral de detección el cual es el valor de la respuesta de aceleración por encima del cual el algoritmo puede encontrar las respuestas máximas asociadas con los vehículos y el tiempo de existencia solitaria, los cuales varían para los resultados de detección de coincidencias del análisis de tráfico en video. Estos parámetros se ajustan para que el algoritmo de detección automática de vehículos sea capaz de encontrar vehículos de interés en el historial de tiempo de aceleración.

El flujo del tráfico y el recuento de los vehículos sirven como parámetro del algoritmo. El flujo de vehículos durante diferentes momentos del día controla directamente otros parámetros como el intervalo de tiempo mínimo, la velocidad y el tiempo de existencia solitaria. El tiempo de avance es un parámetro que permite distinguir entre dos vehículos en un historial de tiempo de aceleración. El algoritmo de detección automática de vehículos distingue camiones de otros tipos de vehículos como automóviles, SUVs, etc. Los valores de THD=0.20 g y TSE=1.86 s, las detecciones promedio por algoritmo y el video de tráfico están desfasados por un valor de 0.80, por lo que esos valores se utilizan para detectar camiones entre otros vehículos en el historial del tiempo de aceleración.

Las estadísticas de la contabilización y el peso asociadas con los vehículos están disponibles para un análisis posterior de estrés y fatiga de la estructura.

En el futuro la precisión del algoritmo de detección automática de vehículos para detectar camiones se validará realizando trabajo experimental que incluye pruebas de vehículos en conjunto con video sincronizado y comparación de datos de un acelerómetro [20].

#### **4.5 Sensores de fibra óptica**

Los sensores de fibra óptica (OFS, por sus siglas en inglés) surgieron después del desarrollo práctico de la fibra óptica en la década de 1970 por Corning Glass Works. En sus primeros días, los dispositivos ópticos, como los láseres, fotodetectores y las propias fibras ópticas, eran bastante costosos. Sin embargo, a mediados de la década de 1980, el uso de sensores de fibra óptica se hizo más accesible a medida que los dispositivos optoelectrónicos se volvieron más económicos. Esta reducción de costos permitió una mayor adopción y aplicaciones más amplias de los sensores de fibra óptica en diversas industrias y campos de estudio. [21].

Existen diversos tipos de sensores de fibra óptica que operan según diferentes principios, como la modulación de intensidad mediante micro flexión, interferometría, efectos de polarización, cambios en el índice de refracción, reflectometría, entre otros. Cada uno de estos principios ofrece enfoques distintos para la detección y medición de diferentes variables o fenómenos. Estos sensores utilizan las propiedades de la fibra óptica y los fenómenos ópticos para capturar y transmitir información sobre cambios en las condiciones ambientales, deformaciones estructurales, cambios en la presión, temperatura, entre otros parámetros. La amplia variedad de sensores de fibra óptica disponibles permite adaptar la elección del sensor al tipo de aplicación específica y a los requerimientos de medición necesarios [22].

#### **4.6 Sensores de rejilla de fibra de Bragg (sensores FBG)**

En 1978, Ken O. Hill, descubrió el efecto de la fotosensibilidad para fibras dopadas con germanio. La exposición a la luz ultravioleta produce un cambio duradero en el índice de refracción. Este efecto se ha aprovechado para aplicarlo a las rejillas de Bragg en fibras ópticas, las cuales son capaces de reflejar picos de longitud de onda muy precisos. Estos picos pueden ser modificados en su longitud de onda a través de cambios en la temperatura o al someter las fibras a tensiones. Los primeros sensores de fibra Bragg comerciales fueron hasta 1995 desde 3M y Photonetics [23].

El término red de fibra de Bragg se tomó prestado de la ley de Bragg y se aplicó a las estructuras periódicas inscritas dentro del núcleo de la fibra de telecomunicaciones convencional [21].

Las fibras ópticas convencionales tienen un índice de refracción constante a lo largo de su longitud. Sin embargo, existe un tipo especial de fibra conocida como rejilla de Bragg de fibra (FBG, por sus siglas en inglés: Fiber Bragg Grating). Una FBG se crea mediante la exposición del núcleo desnudo de la fibra a un patrón de

interferencia óptica intensa, lo que resulta en una perturbación periódica del índice de refracción. Esto significa que se generan regiones dentro de la fibra con un índice de refracción alterado en un patrón repetitivo. Este es un componente óptico pasivo que refleja y transmite luces de forma selectiva en determinadas longitudes de onda. La porción de luz donde la longitud de onda es igual a la longitud de onda de Bragg, se va a reflejar y el resto se transmitirá a través del componente óptico pasivo FBG, de donde la variación del índice de refracción dispersa la luz que atravesará la fibra. En una FBG, las rejillas se refieren a regiones uniformemente espaciadas en la fibra óptica donde el índice de refracción ha sido aumentado en comparación con el resto del núcleo. Estas rejillas dispersan la luz, lo cual es conocido como efecto Bragg. Cuando la luz incide en estas regiones con un índice de refracción más alto, se dispersan haces de luz de cada una de estas regiones, generando interferencia constructiva y resultando en una fuerte refracción de la luz. (Figura 5) [24].

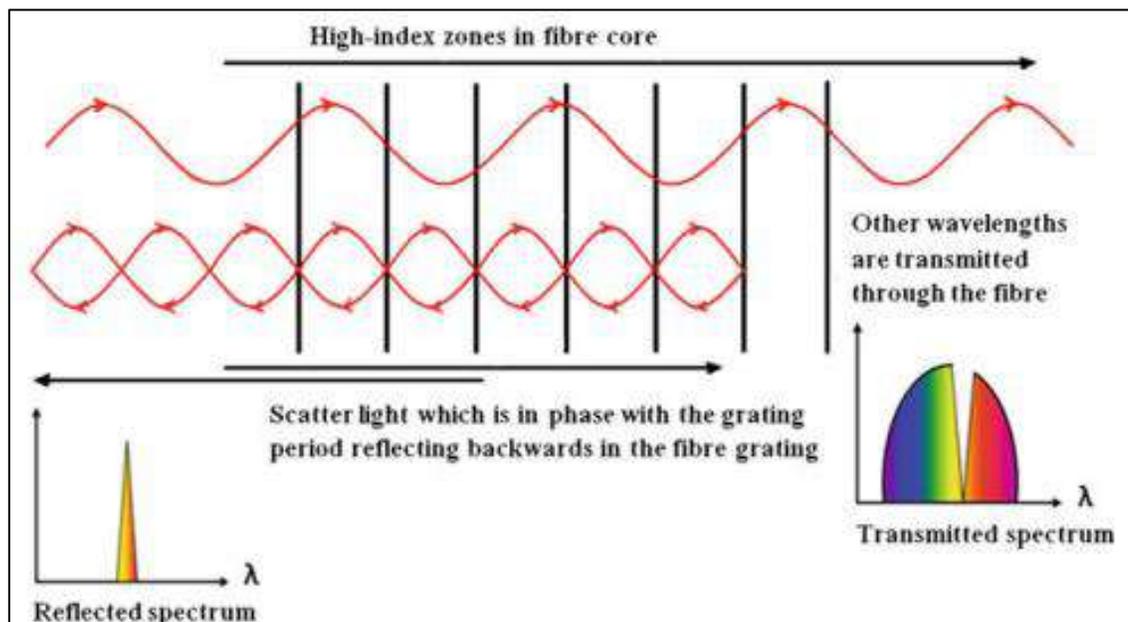


Figura 5 Luz reflejada y transmitida en rejilla de fibra de Bragg [24]

Estas longitudes de onda no resonantes se transmiten a lo largo de la fibra óptica a través de la rejilla con una baja pérdida de señal. La fibra de rejilla de Bragg (FBG) es un ejemplo destacado de fibra óptica diseñada específicamente para cumplir la

función de componentes opcionales y se ha convertido en una tecnología crucial en la detección de fibras ópticas. Las rejillas en una FBG se crean exponiendo el núcleo de la fibra a un patrón periódico de luz ultravioleta durante un período de tiempo determinado. Cuanto mayor sea la duración de esta exposición, más pronunciada será la formación de la FBG en la fibra óptica (figura 6) [24].

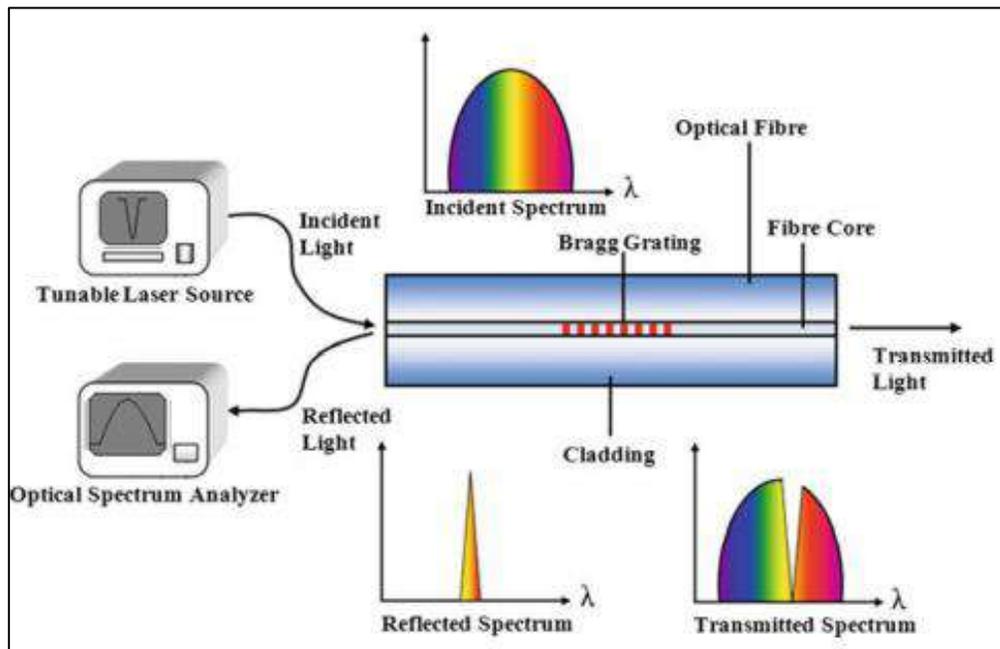


Figura 6 Diagrama esquemático del sistema de fibra de Bragg [24].

#### 4.6.1 Características de las rejillas de fibra de Bragg

Las rejillas de bragg están inscritas en las llamadas fibras monomodo las cuales constan de un núcleo interior de tamaño muy pequeño de 4 – 9  $\mu\text{m}$  de diámetro con un revestimiento de vidrio puro de 125  $\mu\text{m}$  de diámetro.

Los sensores FBG son adecuados para construcciones de materiales compuestos que son sometidos a grandes esfuerzos por lo que pueden medir deformaciones muy grandes del orden de  $> 10,000 \mu\text{m}/\text{m}$ . Estos sensores tienen un diseño compacto y ligero, lo que los hace fácilmente manejables. Además, son altamente

resistentes a la interferencia electromagnética, lo que garantiza mediciones precisas y confiables en entornos con alta actividad eléctrica. Un aspecto destacado es que no requieren alimentación eléctrica para su funcionamiento, ya que son dispositivos intrínsecamente pasivos. Esto significa que pueden operar de manera autónoma sin necesidad de una fuente de energía externa, lo que los hace altamente convenientes y versátiles en diversas aplicaciones. Las señales FBG no dependen de la distancia, por lo que puede haber conexiones > 50 km. En una fibra se pueden ubicar muchas rejillas Fiber Bragg en una fila. Estos sensores tienen estabilidad a largo plazo, resistencia a la corrosión y tienen facilidad de instalación [23].

Debido a que la información de las mediciones está codificada en la onda de la luz reflejada, los sensores FBG son inmunes a estas desviaciones.

Otra característica importante es que, parámetros como la temperatura y la deformación se pueden medir con el mismo sensor. Las mediciones precisas de la deformación en presencia de variaciones de temperatura significativas requieren que las rejillas se desplieguen en pares, una sensible a la temperatura y la deformación, adherida de manera segura a la estructura de interés y otra cercana pero aislada de la deformación, respondiendo solo a la temperatura [22].

#### **4.7 Norma Oficial Mexicana Nom-012-Sct-2-2017, Sobre el Peso y Dimensiones Máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de Jurisdicción Federal**

El Reglamento sobre el peso y dimensiones sustituye el Capítulo XI del Reglamento del Capítulo de Explotación de Caminos de la Ley de Vías Generales de Comunicación y tiene como objeto regular el peso, dimensiones y capacidad a que se deben sujetar los vehículos de autotransporte de pasajeros, turismo y carga que transiten en los caminos de jurisdicción federal conteniendo, entre otros aspectos, los siguientes:

**Artículo 5.** Que el peso, dimensiones y capacidad máxima de los vehículos se ajustarán a las normas correspondientes.

**Artículo 8.** Que la verificación e inspección del peso, dimensiones y capacidad de los vehículos se realizará en centros fijos de verificación de peso y dimensiones que opere la Secretaría, así como en terminales. [9]

El peso bruto vehicular máximo autorizado para cada vehículo o configuración vehicular, según el tipo de camino en que transitan, es el indicado en las tablas 1 y 2.

Tabla 1 Pesos máximos autorizados por tipo de eje y camino.

VEHÍCULO	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	PESO BRUTO VEHICULAR (t)			
			ET y A	B	C	D
B2	2	6	19,0	16,5	14,5	13,0
B3	3	8	24,0	19,0	17,0	16,0
B3	3	10	27,5	23,0	20,0	18,5
B4	4	10	30,5	25,0	22,5	21,0

Tabla 2 Peso bruto vehicular autorizado por clase de vehículo y camino.

VEHÍCULO O CONFIGURACIÓN VEHICULAR	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	PESO BRUTO VEHICULAR (t)			
			ET y A	B	C	D
C2	2	6	19,0	16,5	14,5	13,0
C3	3	8	24,0	19,0	17,0	16,0
C3	3	10	27,5	23,0	20,0	18,5
C2-R2	4	14	37,5	35,5	NA	NA
C3-R2	5	18	44,5	42,0	NA	NA
C3-R3	6	22	51,5	47,5	NA	NA
C2-R3	5	18	44,5	41,0	NA	NA
T2-S1	3	10	30,0	26,0	22,5	NA
T2-S2	4	14	38,0	31,5	28,0	NA
T3-S2	5	18	46,5	38,0	33,5	NA
T3-S3	6	22	54,0	45,5	40,0	NA
T2-S3	5	18	45,5	39,0	34,5	NA
T3-S1	4	14	38,5	32,5	28,0	NA
T2-S1-R2	5	18	47,5	NA	NA	NA
T2-S1-R3	6	22	54,5	NA	NA	NA
T2-S2-R2	6	22	54,5	NA	NA	NA
T3-S1-R2	6	22	54,5	NA	NA	NA
T3-S1-R3	7	26	60,5	NA	NA	NA
T3-S2-R2	7	26	60,5	NA	NA	NA
T3-S2-R4	9	34	66,5	NA	NA	NA
T3-S2-R3	8	30	63,0	NA	NA	NA
T3-S3-S2	8	30	60,0	NA	NA	NA
T2-S2-S2	6	22	51,5	NA	NA	NA
T3-S2-S2	7	26	58,5	NA	NA	NA

NA- No Autorizado

## **5. Hipótesis**

El desarrollo de un nuevo algoritmo a partir de la correlación de las respuestas dinámicas de un sistema de monitoreo, con el peso y clasificación vehicular, mediante pruebas controladas con dos tipos de configuraciones de vehículos de autotransporte con peso conocido, permitirá identificar y clasificar vehículos de autotransporte que presenten sobrecarga en el puente Río Papaloapan.

## **6. Objetivos**

### **6.1 Objetivo general**

Desarrollar e implementar un nuevo algoritmo que permita identificar y clasificar vehículos de autotransporte que presenten sobrecarga.

### **6.2 Objetivos específicos**

- Utilizar datos reales del sistema SHM del puente Río Papaloapan.
- Llevar a cabo pruebas experimentales no controladas sobre el puente Río Papaloapan con vehículos de autotransporte.
- Llevar a cabo pruebas experimentales controladas en el puente Río Papaloapan con vehículos de autotransporte de configuración C3.
- Correlacionar las respuestas dinámicas del sistema SHM con el peso y clasificación vehicular mediante pruebas controladas con cuatro tipos de configuraciones de vehículos de autotransporte con peso conocido.
- Identificar las variables estructurales más adecuadas que puedan asociar el peso bruto vehicular con las respuestas dinámicas.
- Identificar factores que puedan afectar el peso bruto vehicular.
- Validar el algoritmo para identificar la configuración vehicular y clasificación del autotransporte que transita sobre el puente.

## 7. Metodología

El proceso metodológico utilizado para desarrollar e implementar un nuevo algoritmo que permita identificar con mayor precisión los vehículos de autotransporte que presenten sobrecarga en un puente instrumentado atirantado se describe a continuación.

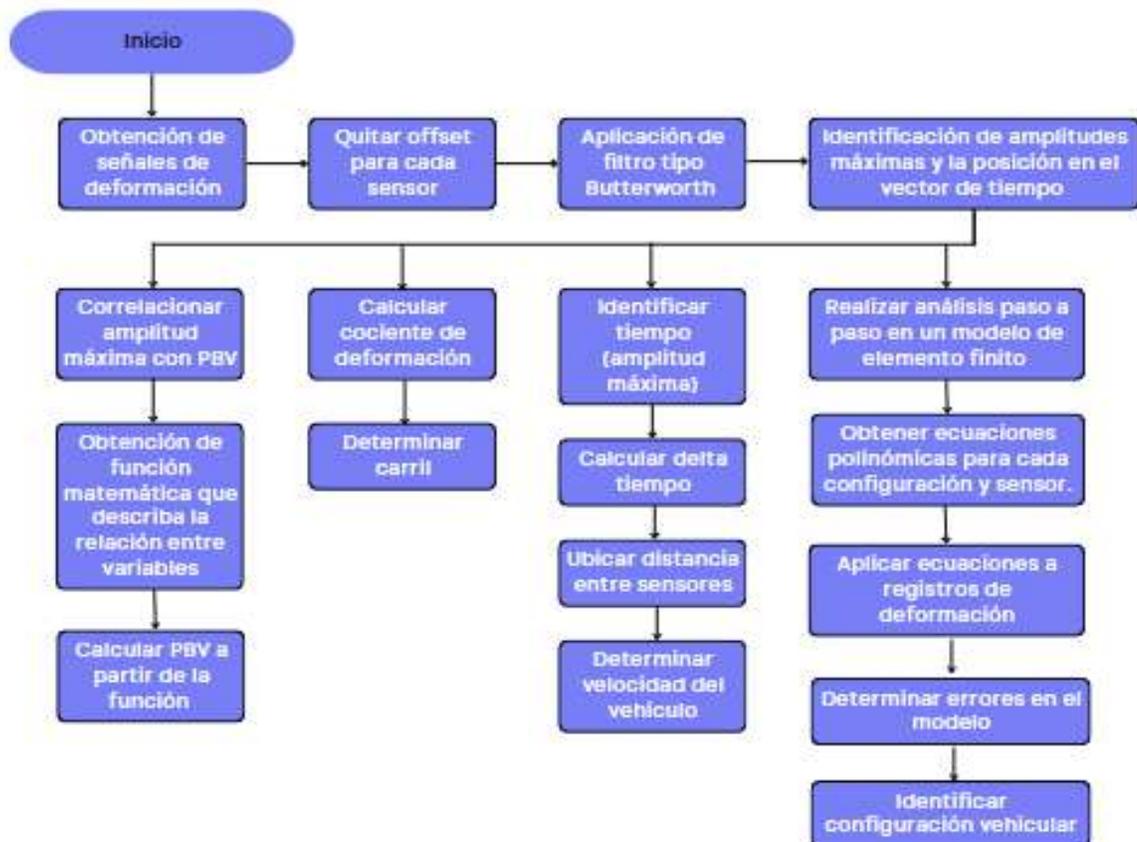


Figura 7 Metodología para la identificación vehicular.

### **7.1 Definición de tipo de pruebas experimentales y vehículos en el puente Río Papaloapan.**

Inicialmente, se definió que el tipo de pruebas a realizar serían de dos tipos: i) Pruebas controladas con vehículos de autotransporte de configuración vehicular C3 y ii) Pruebas no controladas con vehículos de autotransporte de configuración vehicular T3S2. Ambas pruebas se realizaron a velocidades controladas utilizando vehículos de autotransporte con peso y dimensiones conocidas.

El vehículo de autotransporte C3, consta de un camión unitario, el cual se denomina como tipo C, el cual se define como un vehículo automotor de 3 ejes con ocho o diez llantas, el cual está destinado al transporte de carga. Se decidió por utilizar esta configuración vehicular para las pruebas dinámicas controladas ya que, un aspecto muy importante sobre este vehículo es que la mayor parte del peso se encuentra en los ejes traseros, y debido a la longitud del vehículo, la carga se concentra en una menor área, de modo que, tiene un espectro de carga con niveles de sobrecarga importantes.

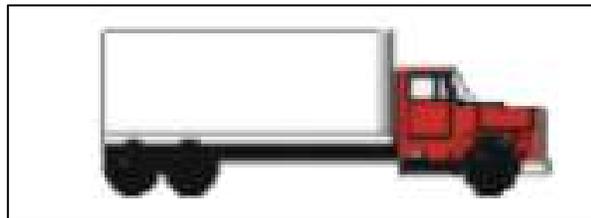


Figura 8 Vehículo de autotransporte de configuración vehicular C3 [9].

El vehículo de autotransporte T3S2 es un vehículo de 5 ejes con 18 llantas, destinado al transporte de carga el cual se constituye por un tractocamión y un semirremolque.

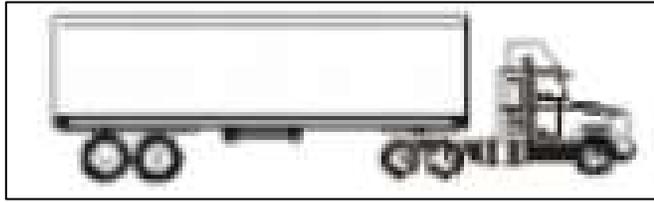


Figura 9 Vehículo de autotransporte de configuración vehicular T3S2 [9].

Otro aspecto relevante de estas configuraciones vehiculares es que acuerdo a los datos viales del año 2022, se registró un Tráfico Diario Promedio Anual (TDPA) en el puente Río Papaloapan de 5794 vehículos, de los cuales 348 vehículos corresponden al tipo C3 y 1136 vehículos al tipo T3S2, siendo el 6% y el 19.6% respectivamente [25].

### **7.2 Desarrollo del plan y estrategia para la evaluación de la información del sistema de monitoreo en pruebas experimentales controladas y no controladas sobre el puente Río Papaloapan con vehículos de autotransporte.**

Posterior a la definición del tipo de pruebas y vehículos, se elaboró la siguiente lista de actividades necesarias para poder efectuar las pruebas correctamente:

- A) Obtención de diversos permisos de CAPUFE para realizar las pruebas en el puente Río Papaloapan debido a las actividades en el puente y al cierre de tránsito durante éstas.
- B) Elaboración de croquis para ubicación de sensores de deformación en el tablero.
- C) Elaboración de programa de actividades para 2 días de pruebas.
- D) Elaboración de formatos de llenado para pesajes de vehículos que participan en las pruebas.
- E) Distribución de equipos de trabajo para laborar en pruebas.

Para poder correlacionar el peso de los vehículos que participan en las pruebas, se utilizó la respuesta dinámica de 24 sensores de deformación unitaria, de los cuales

10 están ubicados por debajo de cada una de las dos vigas principales del tablero del puente y un sensor en el costado ubicado a media altura de cada torre del puente.

A continuación, en la siguiente tabla se muestra una descripción de las pruebas experimentales controladas y los vehículos de autotransporte utilizados:

Tabla 3 Descripción de pruebas experimentales controladas y los vehículos de autotransporte utilizados.

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

En la siguiente tabla, se observan los pesos de los vehículos de configuración vehicular C3 y T3S2 obtenidos mediante una pesadora estática de tipo portátil, la cual fue instalada in-situ para determinar los pesos por eje y el peso bruto vehicular para cada vehículo de autotransporte.

Tabla 4 Peso bruto vehicular de vehículos de autotransporte de configuración vehicular C3.

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

Tabla 5 Peso bruto vehicular de vehículos de autotransporte de configuración vehicular T3S2.

<b>PLACA</b>	<b>EJE 1</b>	<b>EJE 2</b>	<b>EJE 3</b>	<b>EJE 4</b>	<b>EJE 5</b>	<b>PBV</b>
	<b>TOTAL</b>					
	<b>PESOS (t)</b>					
<b>607WP7</b>	4.55	9.38	9.06	9.45	10.05	42.5
<b>9-XDB-40A</b>	4.98	4.95	5.04	4.38	4.59	23.94

### **7.3 Identificación de variables estructurales sensibles a la configuración vehicular.**

Se registraron señales de deformación unitaria con una tasa de muestreo de 125 Hz, en diferentes puntos a lo largo del tablero del puente en los puntos de medición R1, R2, R4, R5, R6, R7, R8, R11 y R12, mientras que se realizaron las pruebas controladas y no controladas.

De lo anterior, se observó que la amplitud de la respuesta dinámica y el tiempo de respuesta por carga viva por el paso de los vehículos en cada una de las pruebas prueba varía dependiendo de la carga, el peso por ejes y las dimensiones que posee cada vehículo.

#### **7.4 Diseño y desarrollo de un algoritmo para identificar la configuración vehicular y clasificación del vehículo autotransporte que transita sobre el puente.**

Para el proceso de diseño y desarrollo del algoritmo se utilizó el lenguaje de programación Python. El lenguaje de programación Python es un lenguaje de programación de alto nivel interpretado y multiplataforma el cual es de propósito general. Es simple, rápido, dinámico e interactivo, lo que favorece su uso [26].

Inicialmente, para que la señal de deformación unitaria sea procesada, se removió la señal de asociada a los cambios térmicos y por carga estática, denominada offset. El proceso consiste en restar aritméticamente la media estadística de los datos a la señal original. El proceso se repite para cada extensómetro con el fin de adecuar el tipo de dato antes de que estos sean filtrados.

Con la finalidad de disminuir el ruido o datos indeseados generados por el mismo sistema de adquisición de datos, se empleó un pre-procesamiento de datos aplicando un filtro tipo Butterworth en configuración pasa banda, de segundo orden, con una frecuencia baja de 0.01 Hz y una frecuencia alta de 1.5 Hz [12].

Tras el filtrado, se continuó con una función de búsqueda para encontrar las amplitudes máximas a tensión (picos) de la señal filtrada y la posición en el vector de tiempo. Siendo así que, cada pico, corresponde al paso de un vehículo C3 de peso conocido y con ello, identificar los valores correspondientes a las deformaciones unitarias máximas ( $\mu\epsilon$ ) de cada uno de los vehículos que transitaron por el puente.

Para poder determinar la velocidad a la que transitaba el vehículo, se identificó el tiempo antes de la amplitud máxima, el tiempo en que ocurrió la amplitud máxima y el tiempo después. Con esta información se calcula un delta de tiempo, el cual es la diferencia de los tiempos entre los extensómetros donde ocurre la amplitud máxima, para obtener la velocidad dividiendo el delta de tiempo entre la distancia donde se ubican los extensómetros.

Posteriormente, se correlacionó la amplitud máxima, en el sensor de deformación elegido, con los datos del peso bruto vehicular obtenidos por la pesadora estática.

Finalmente, 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.

### **7.5 Desarrollo de un modelo de elemento finito (MEF) para análisis o simulación de efectos de carga viva, así como respuestas dinámicas.**

Entre los algoritmos más usados está el del método de elementos finitos (FEM) con el cual pueden resolverse estructuras que son consideradas como continuas y que su comportamiento está regido por ecuaciones diferenciales. La solución de estos sistemas consiste en discretizar el cuerpo en elementos geométricos que se encuentran unidos por nodos y que tienen sus propiedades y comportamiento regidos por ecuaciones de compatibilidad de deformaciones. De esta manera, al analizar estos elementos, se pasa de resolver ecuaciones diferenciales (que rigen el comportamiento del sistema continuo) a sistemas de ecuaciones algebraicas más simples, las cuales luego son ensambladas para dar origen a la solución aproximada del sistema continuo.

Estos modelos también ayudan para el diseño de la instrumentación de los sensores en la estructura. A su vez, éstos pueden ser calibrados usando los resultados del monitoreo o mediante pruebas controladas para generar las condiciones y mecanismos reales que pueden servir como un punto de referencia para la evaluación de la integridad estructural o el desempeño de la estructura.

El SAP2000 es un programa de elementos finitos, con interfaz gráfico 3D orientado a objetos, preparado para realizar, de forma totalmente integrada, la modelación, análisis y dimensionamiento de lo más amplio conjunto de problemas de ingeniería de estructuras.

Utilizando un modelo de elemento finito del Puente Río Papaloapan calibrado (figura 9), se realizó un Análisis paso a paso considerando el paso de un vehículo de autotransporte operando en el carril de alta velocidad.

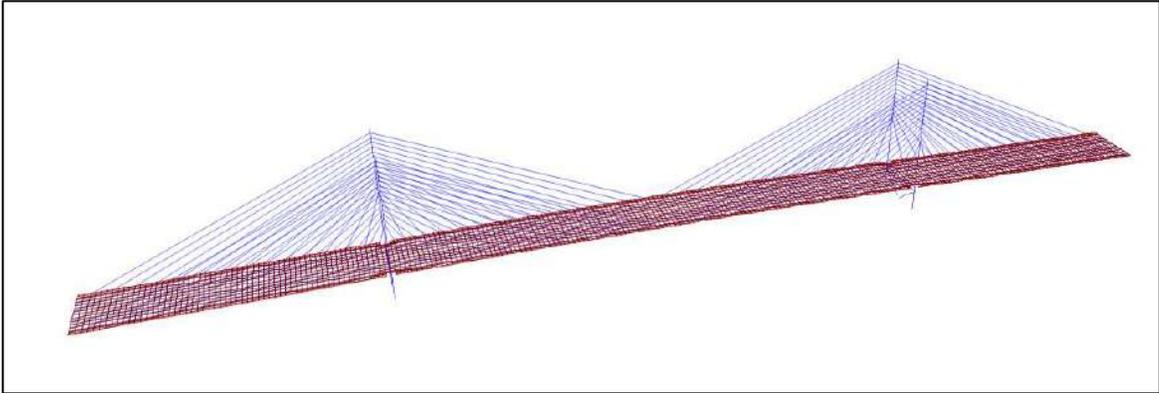


Figura 10 Modelo de elemento finito del puente Río Papaloapan.

Para ello se utilizaron los datos de los pesos brutos vehiculares obtenidos de la pesadora estática para los vehículos C3 y T3S2 para posteriormente ubicarlos dentro del modelo del puente.

Se definió el número de vehículos para actuar sobre el carril de alta velocidad en el cuerpo A del puente.

Solo se consideraron las cargas por eje de cada vehículo, omitiendo cargas uniformes. Se utilizó una distribución transversal de las cargas por eje, siendo así que el vehículo se mueve longitudinalmente a lo largo de la línea central del carril a partir de los paths añadidos.

Se ingresaron los parámetros de la carga viva, especificando la posición de inicio y fin en el carril, una velocidad constante y la dirección en la que se transita. También se especificó el tamaño del paso del tiempo y el número total de pasos de tiempo a considerar siendo 450 pasos para poder abarcar toda la longitud del puente. Para poder obtener una discretización espacial más fina de la carga, se discretizó a cada 0.5 segundos.

A partir del análisis paso a paso se obtuvieron los elementos mecánicos en todos los elementos que conforman la estructura del puente. Cada paso del análisis corresponde a una posición específica de cada vehículo que actúa sobre el carril.

Se obtuvieron los datos de deformación en la posición de cada uno de los extensómetros R1, R2, ... R12 a partir del momento flexionante para cada uno de los vehículos C3 y T3S2.

## 8. Resultados y Discusión

### 8.1 Implementación del algoritmo

Tras la obtención de las señales en cada una de las pruebas dinámicas, se procedió a procesar la señal mediante el algoritmo descrito.

Al aplicar el filtro con las características ya mencionadas, se obtienen las siguientes señales para cada uno de los sensores.

#### 8.1.1 Señales de deformación unitaria

##### 8.1.1.1 Prueba DIN1

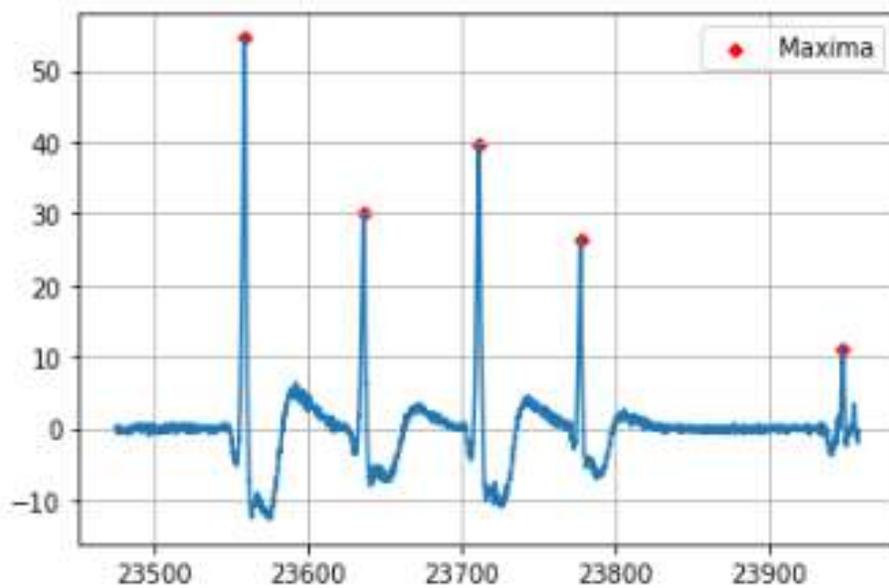


Figura 11 Prueba DIN1, sensor R1.

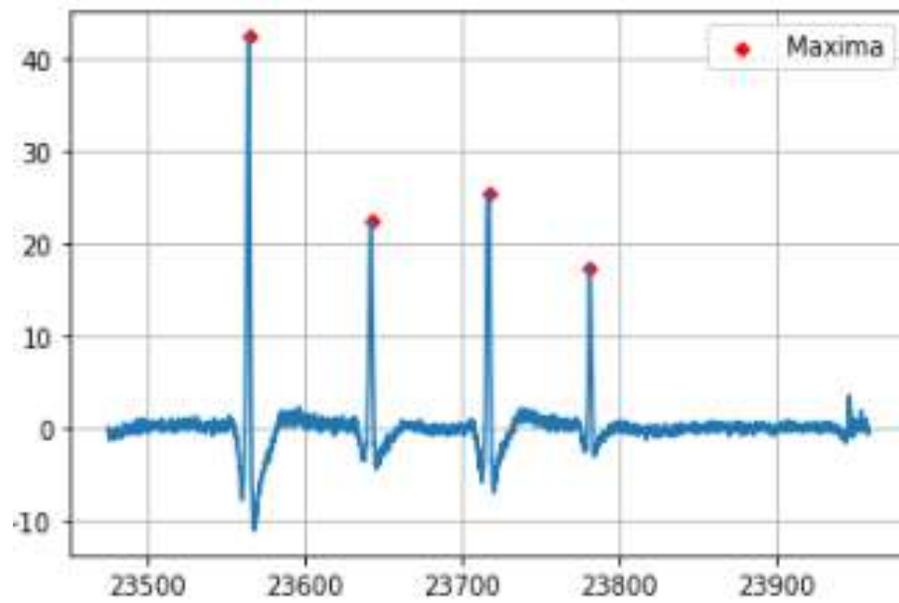


Figura 12 Prueba DIN1, sensor R2.

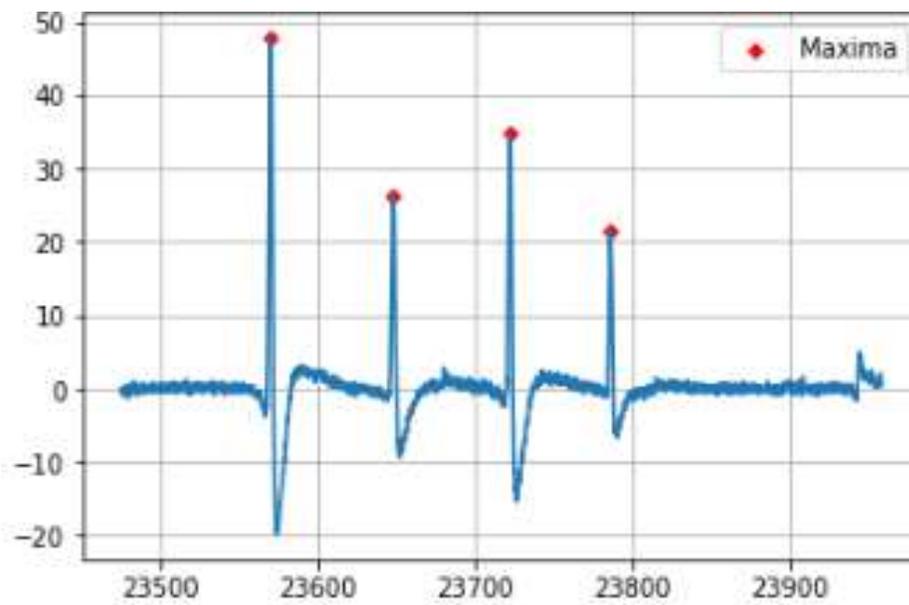


Figura 13 Prueba DIN1, sensor R4.

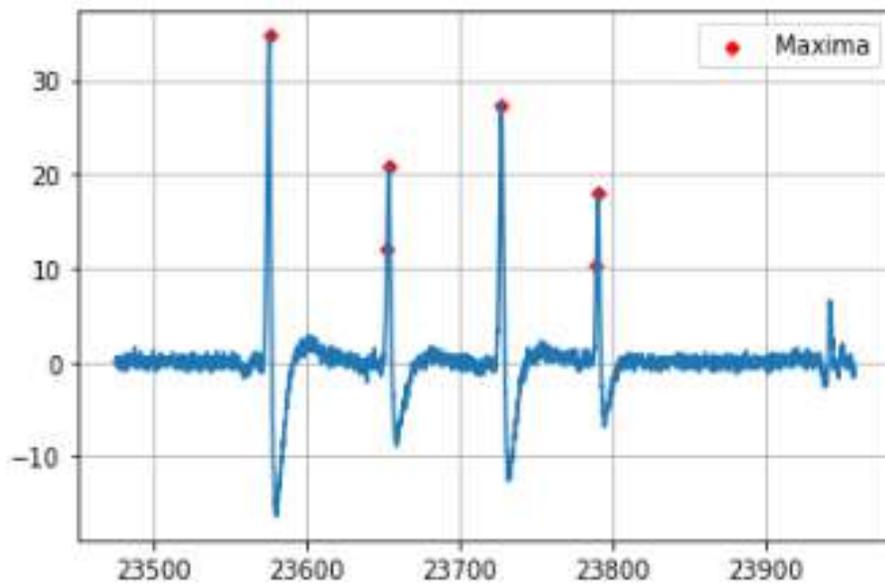


Figura 14 Prueba DIN1, sensor R5.

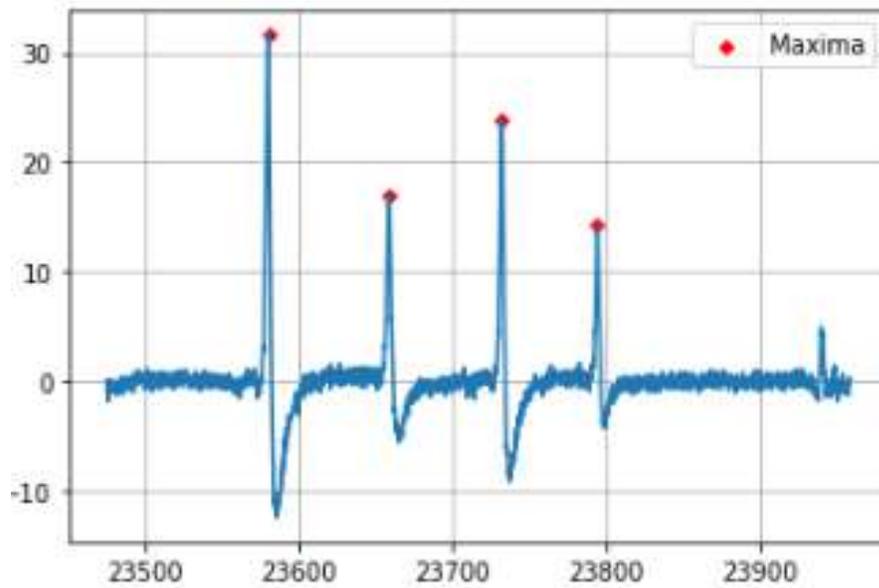


Figura 15 Prueba DIN1, sensor R6.

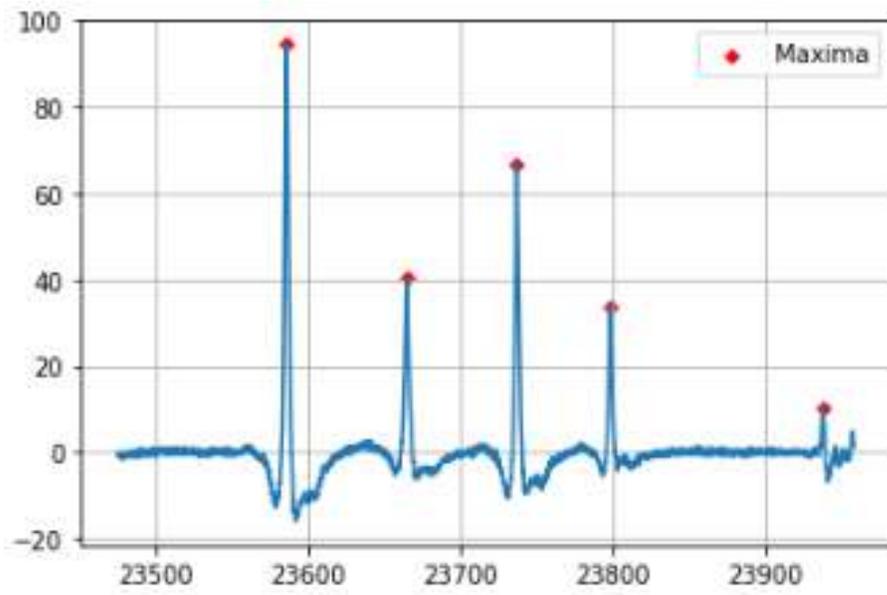


Figura 16 Prueba DIN1, sensor R7.

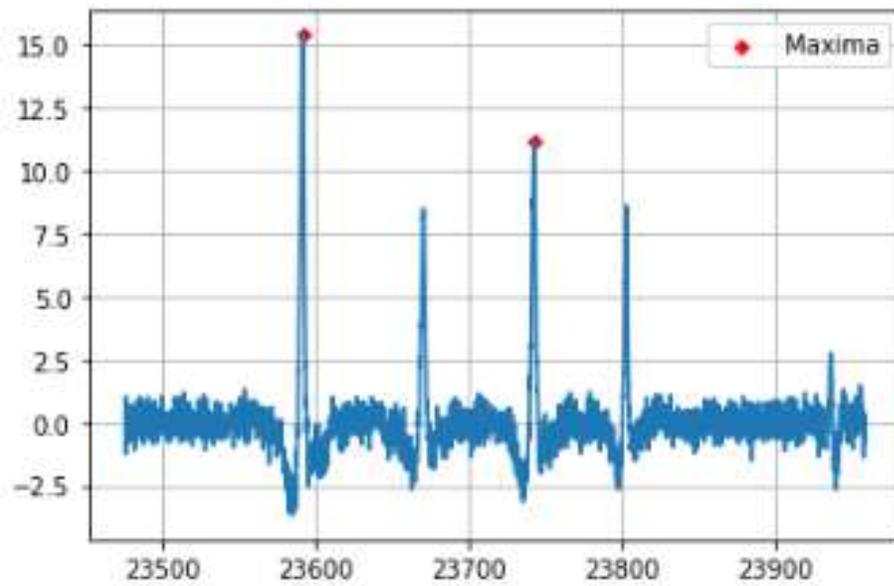


Figura 17 Prueba DIN1, sensor R8.

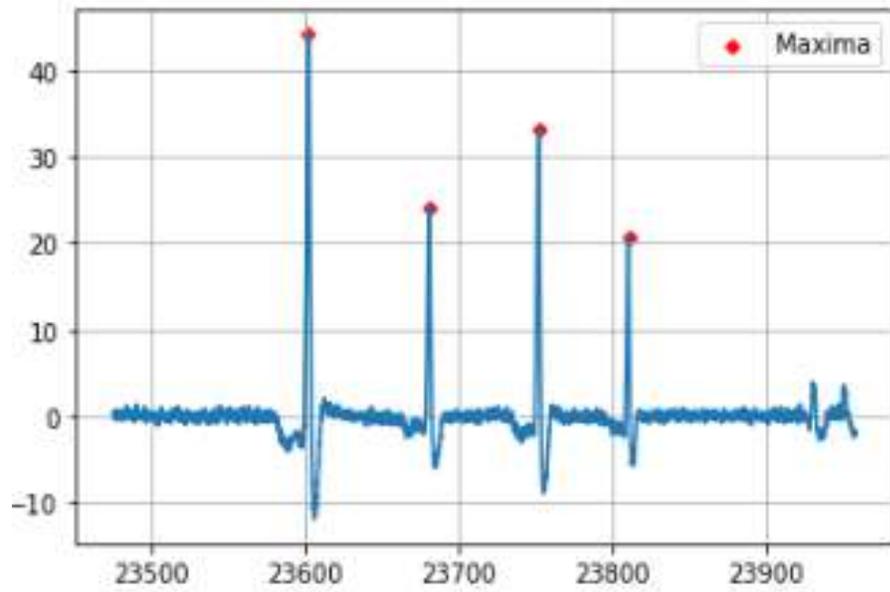


Figura 18 Prueba DIN1, sensor R11.

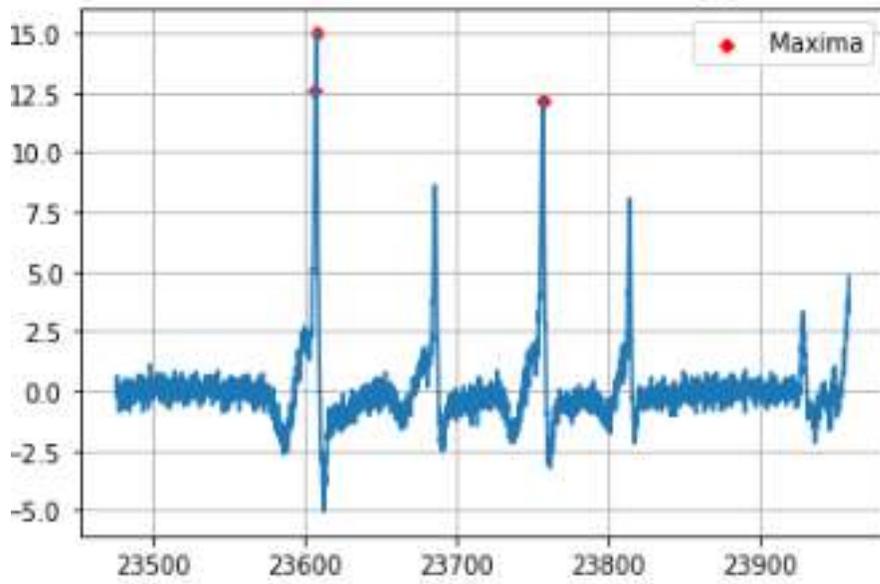


Figura 19 Prueba DIN1, sensor R12.

### 8.1.1.2 Prueba DIN2

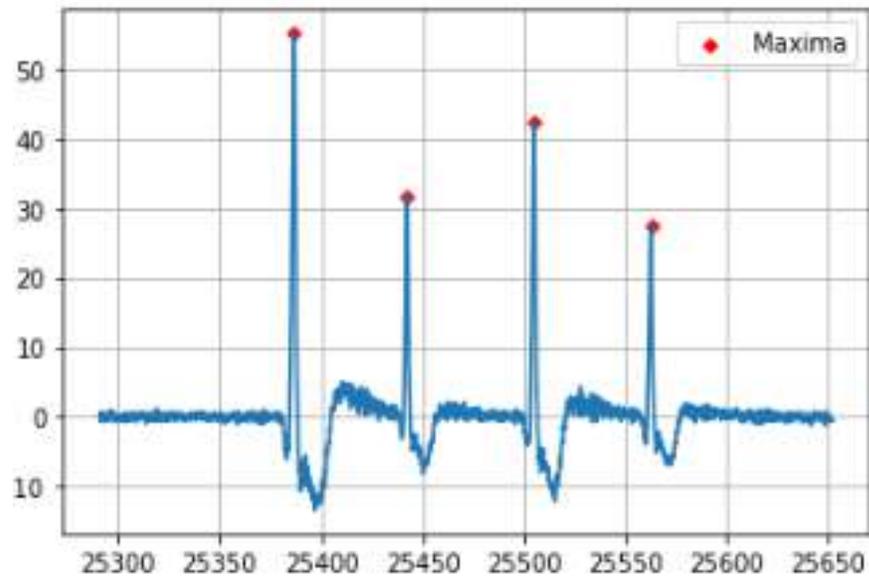


Figura 20 Prueba DIN2, sensor R1.

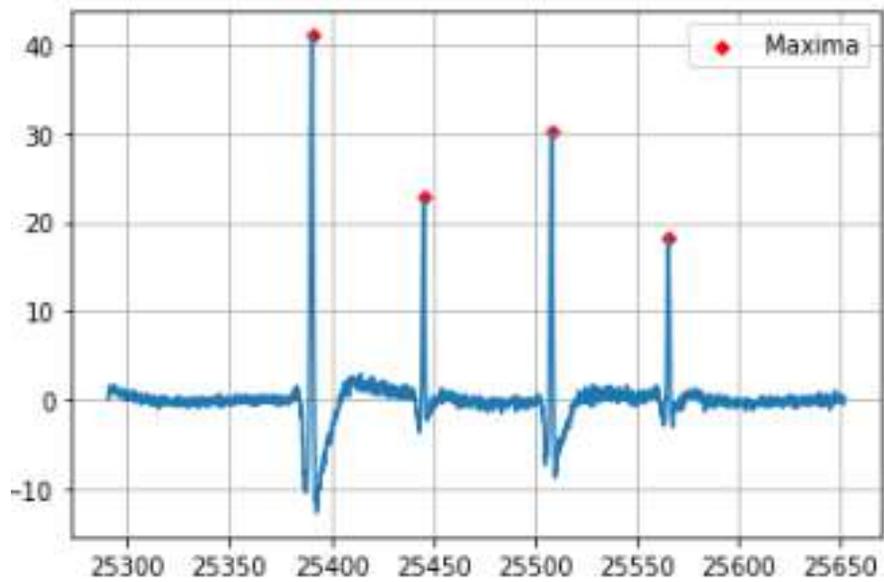


Figura 21 Prueba DIN2, sensor R2.

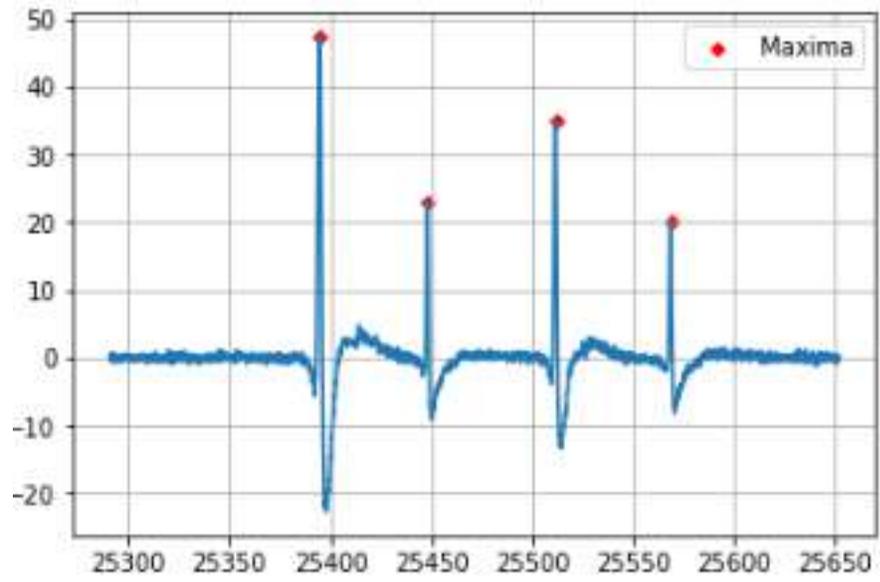


Figura 22 Prueba DIN2, sensor R4.

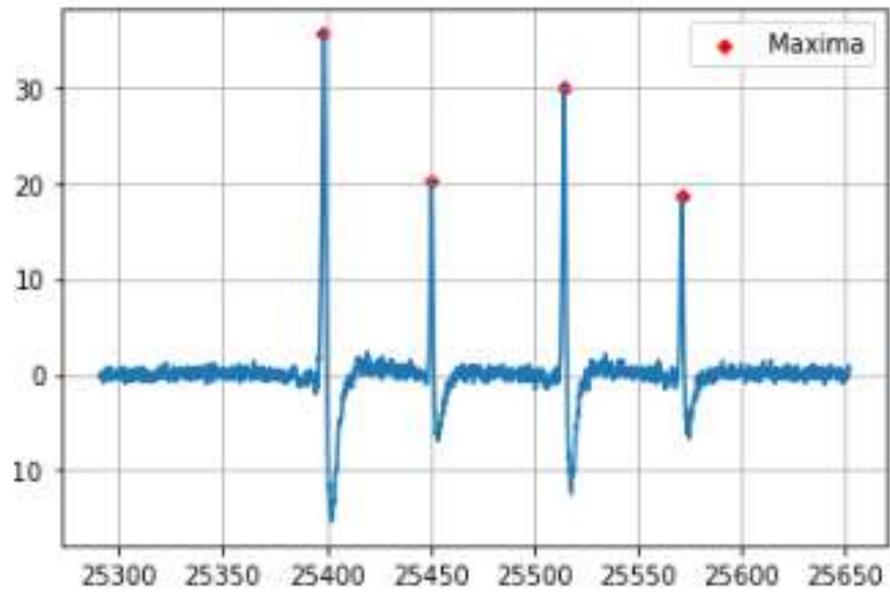


Figura 23 Prueba DIN2, sensor R5.

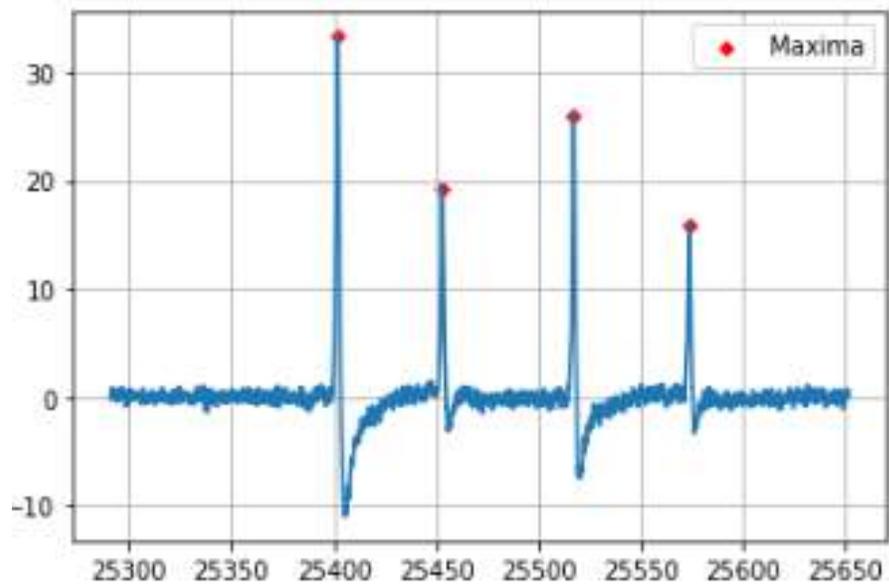


Figura 24 Prueba DIN2, sensor R6.

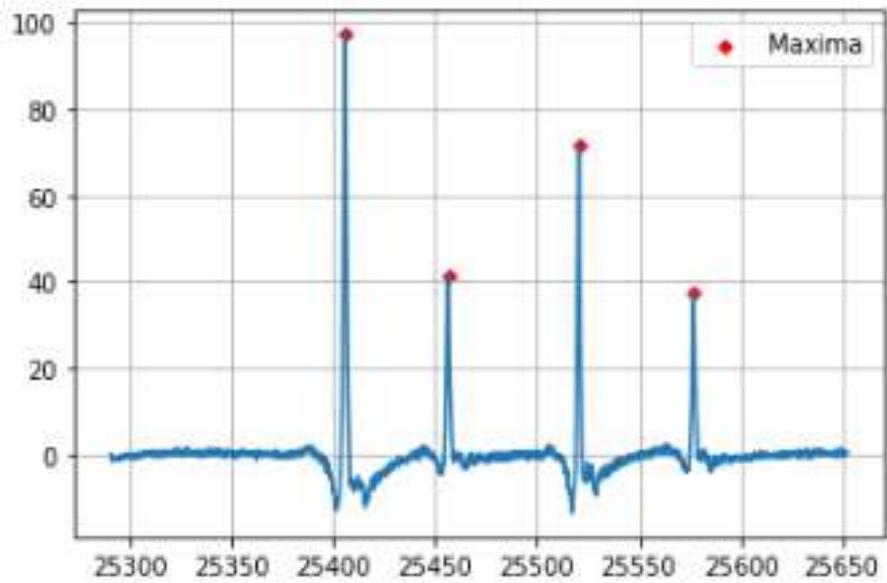


Figura 25 Prueba DIN2, sensor R7.

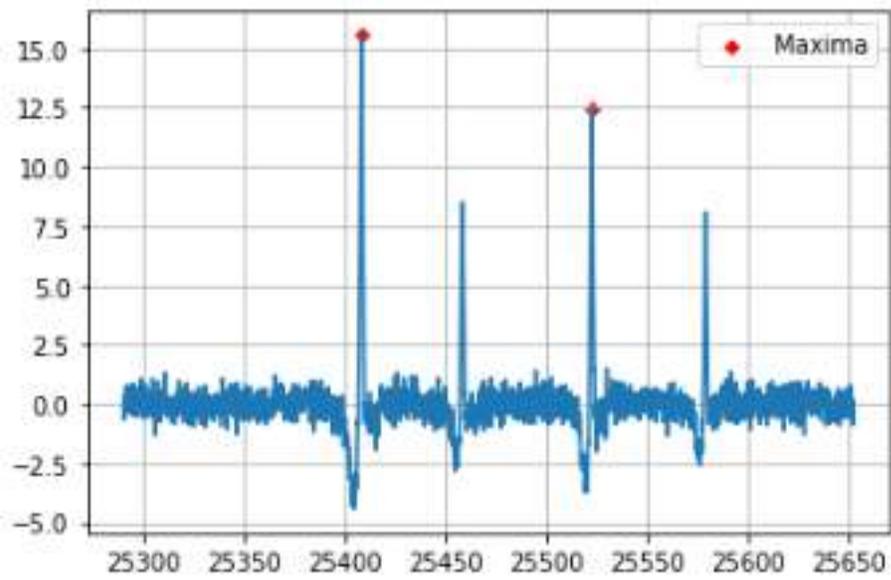


Figura 26 Prueba DIN2, sensor R8.

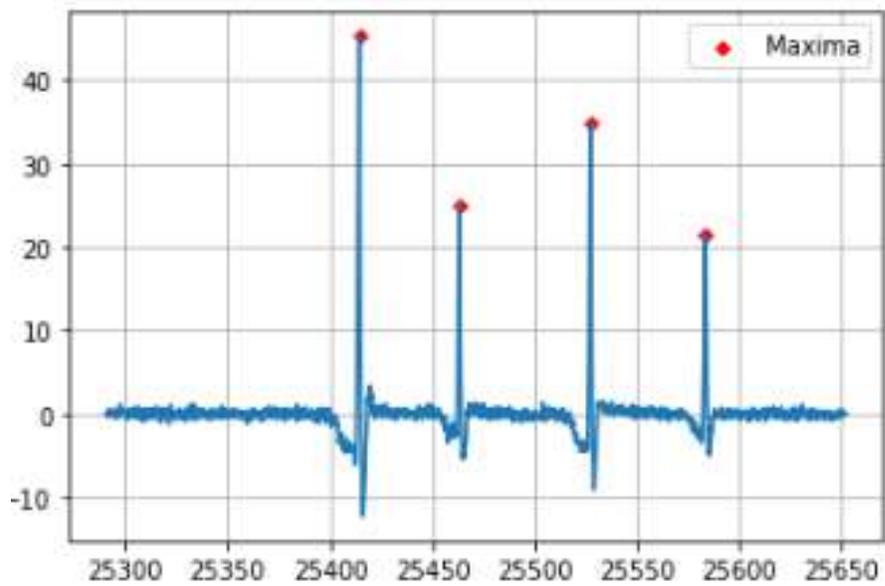


Figura 27 Prueba DIN2, sensor R11.

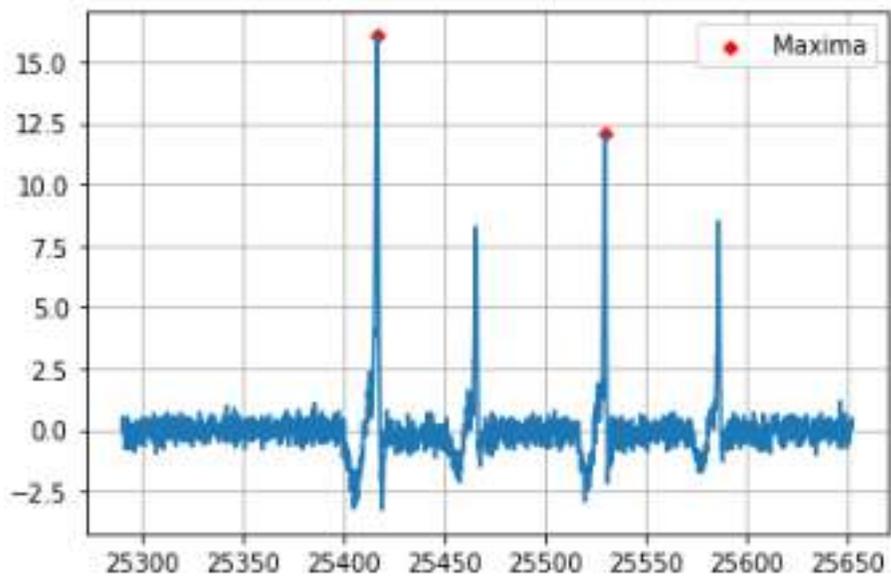


Figura 28 Prueba DIN2, sensor R12.

### 8.1.1.3 Prueba DIN3

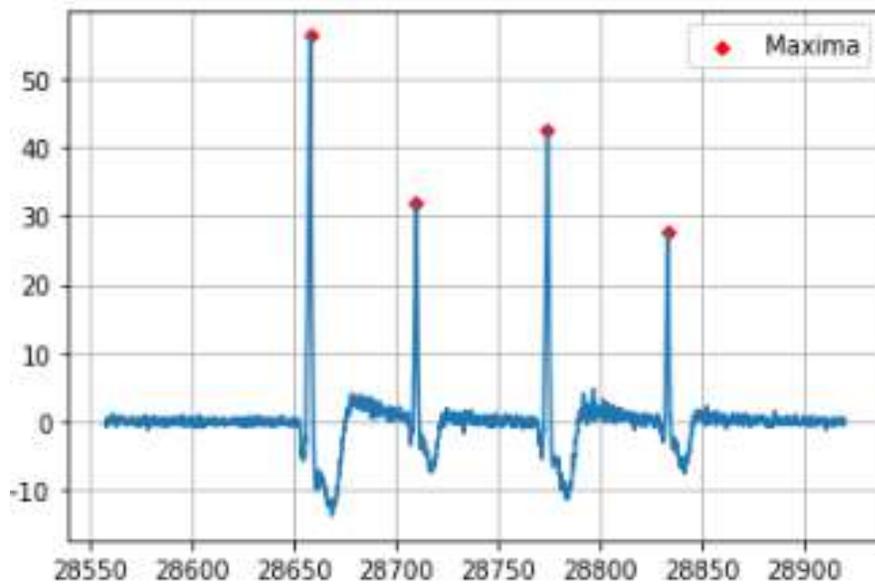


Figura 29 Prueba DIN3, sensor R1.

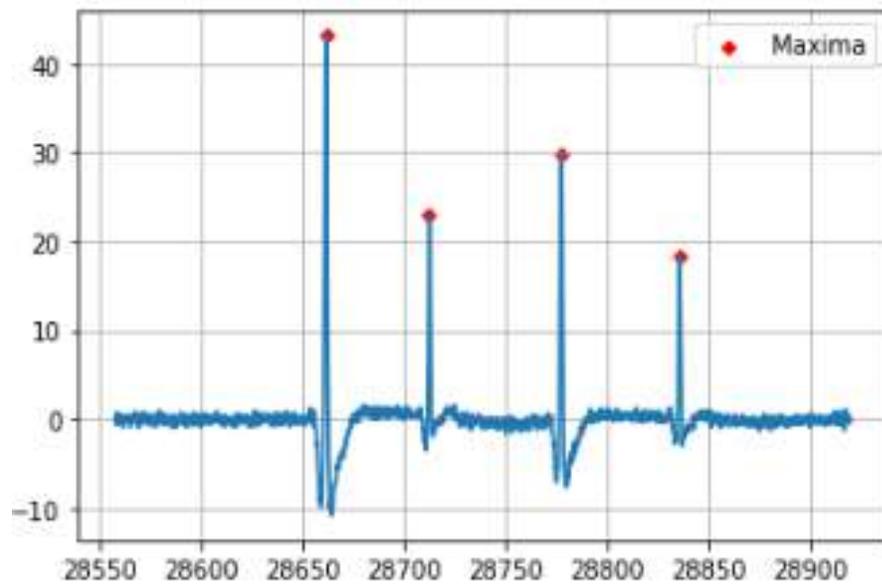


Figura 30 Prueba DIN3, sensor R2.

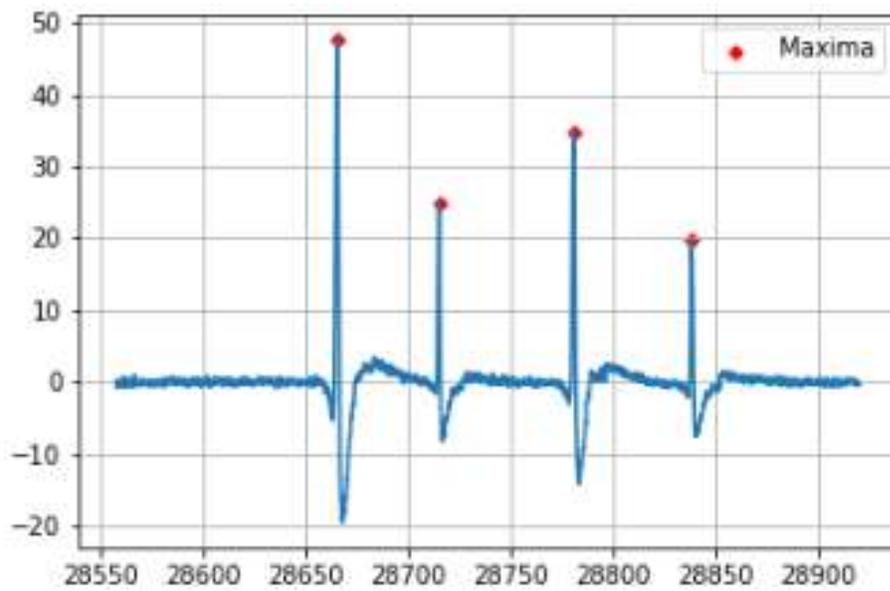


Figura 31 Prueba DIN3, sensor R4.

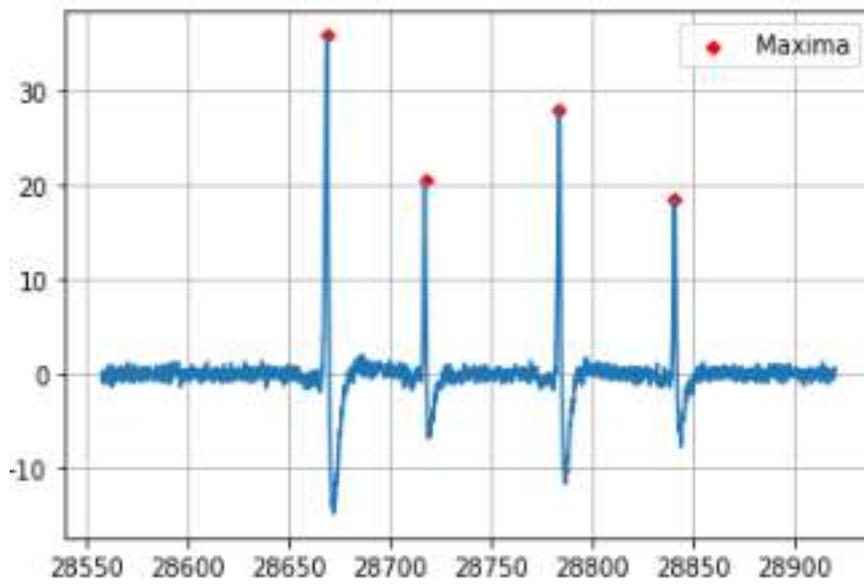


Figura 32 Prueba DIN3, sensor R5.

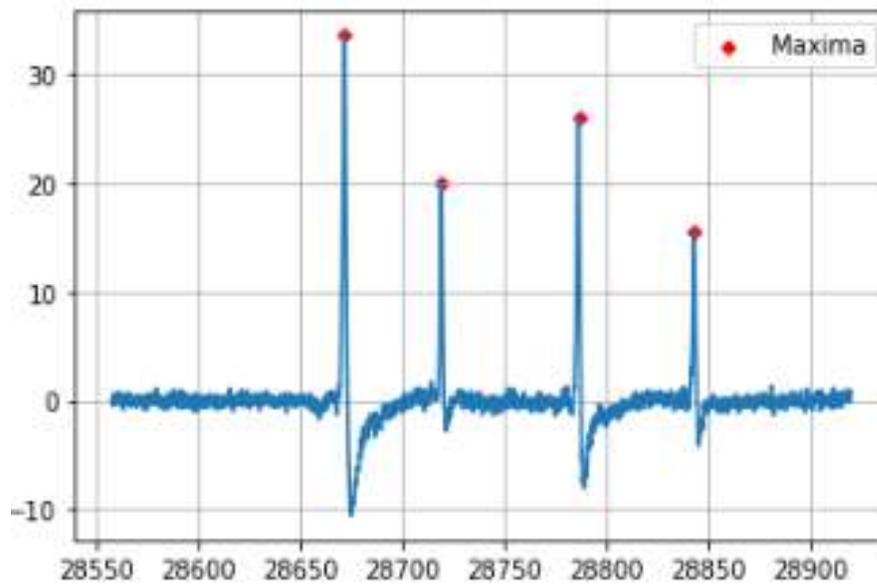


Figura 33 Prueba DIN3, sensor R6.

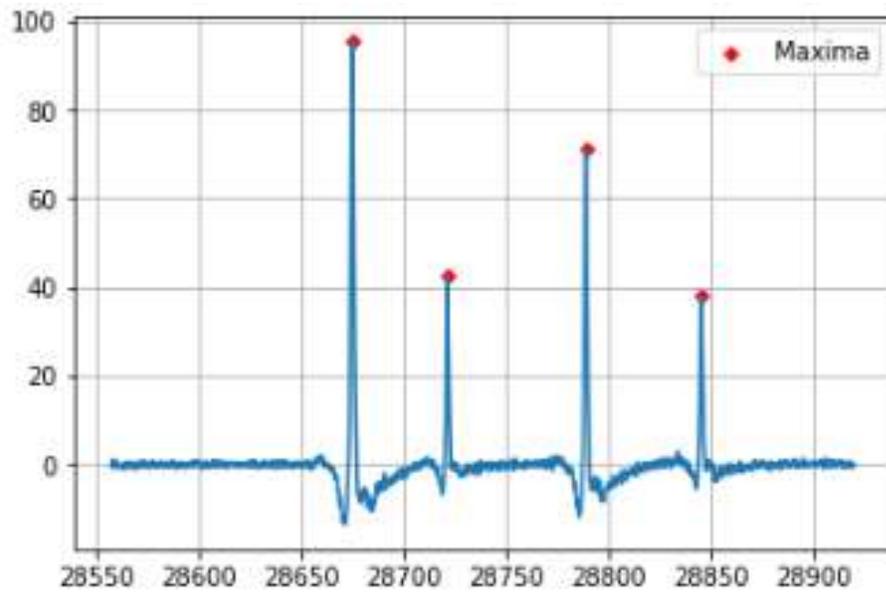


Figura 34 Prueba DIN3, sensor R7.

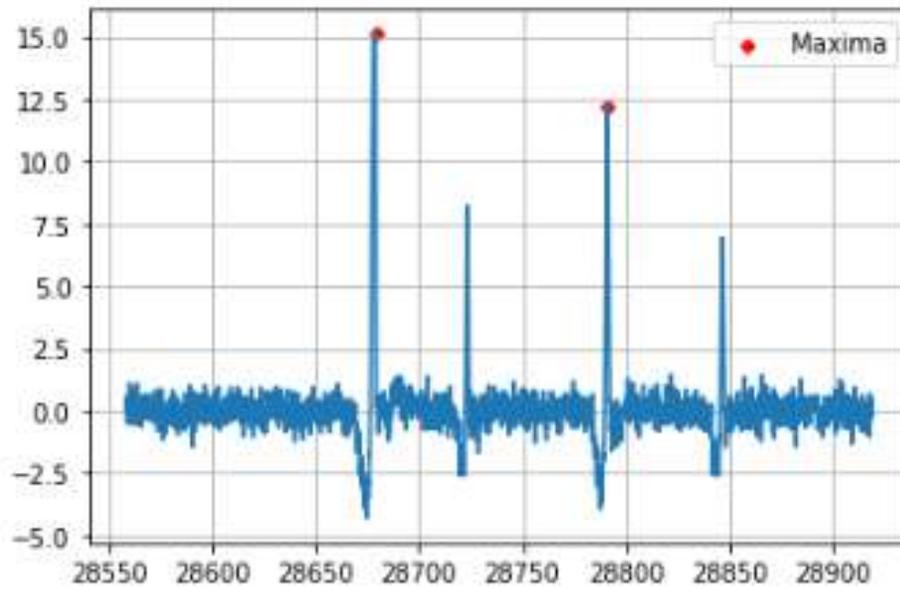


Figura 35 Prueba DIN3, sensor R8.

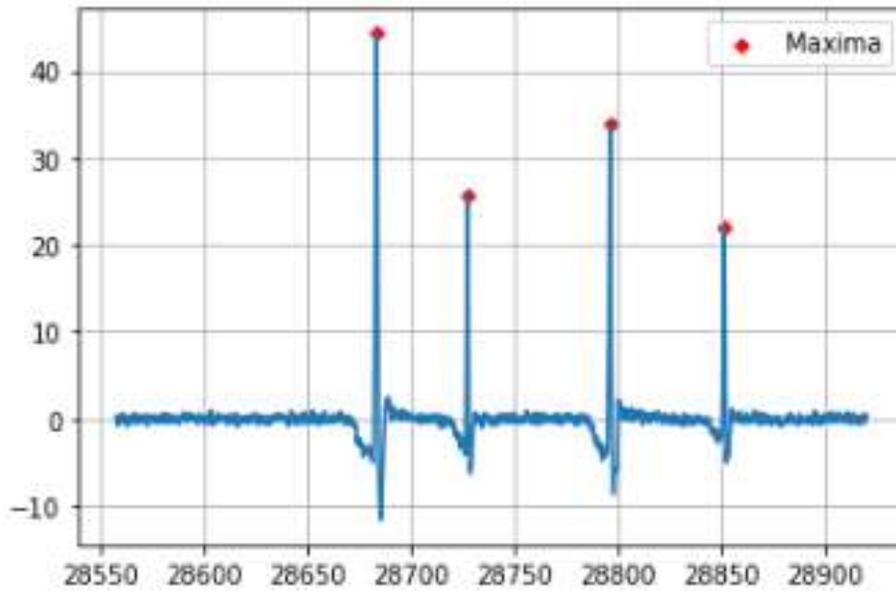


Figura 36 Prueba DIN3, sensor R11.

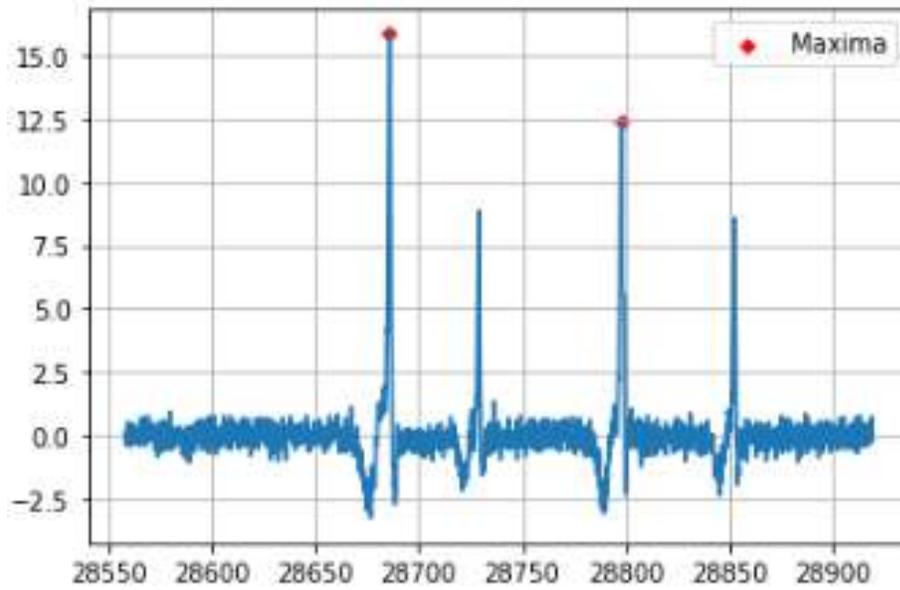


Figura 37 Prueba DIN3, sensor R12.

### 8.1.1.4 Prueba DIN4

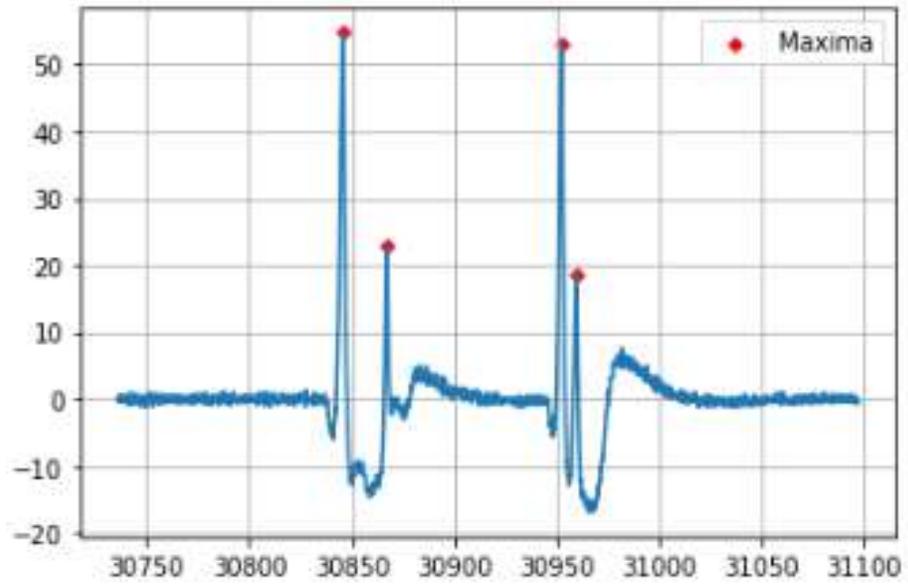


Figura 38 Prueba DIN4, sensor R1.

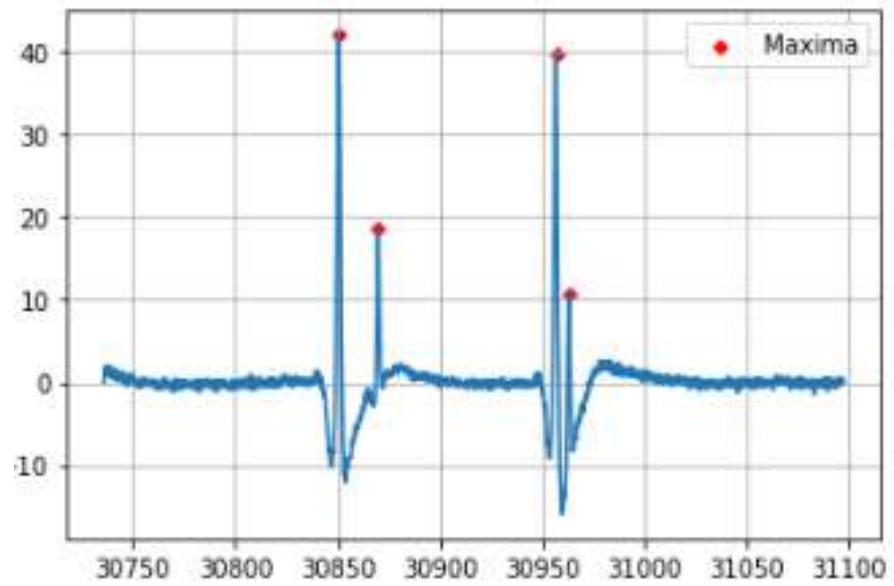


Figura 39 Prueba DIN4, sensor R2.

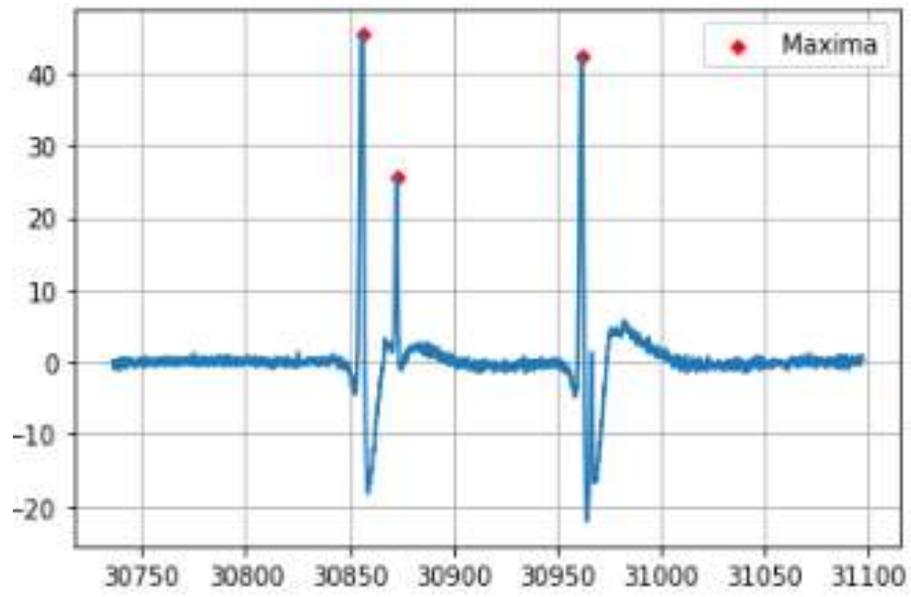


Figura 40 Prueba DIN4, sensor R4.

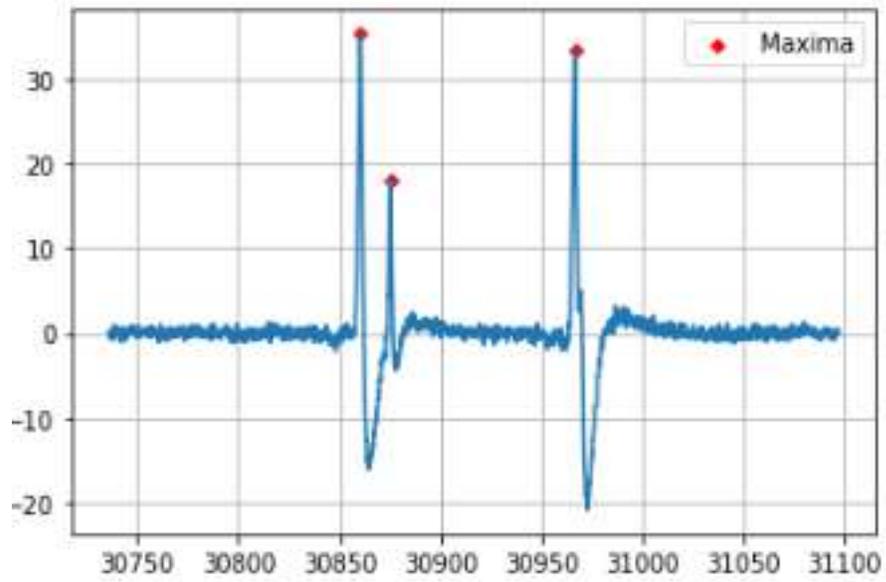


Figura 41 Prueba DIN4, sensor R5.

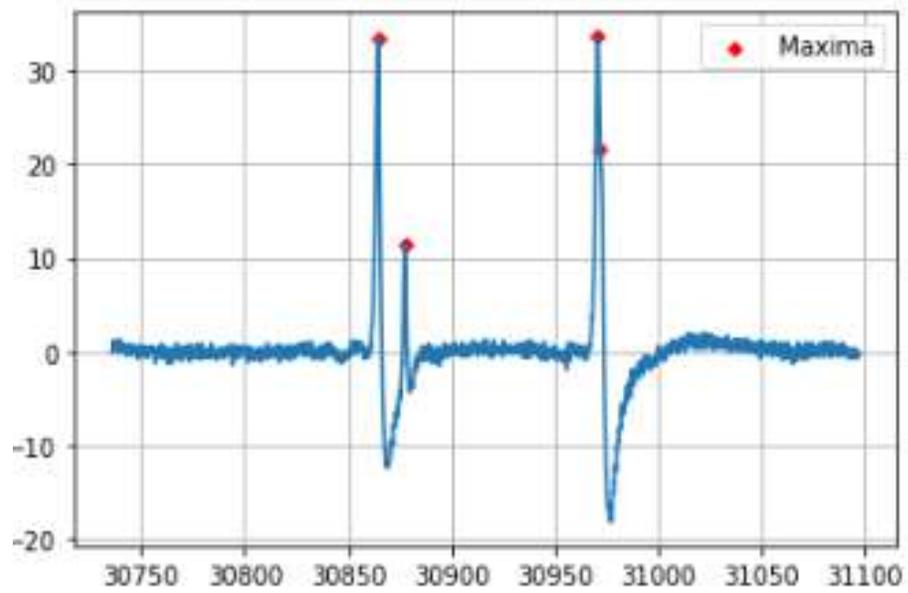


Figura 42 Prueba DIN4, sensor R6.

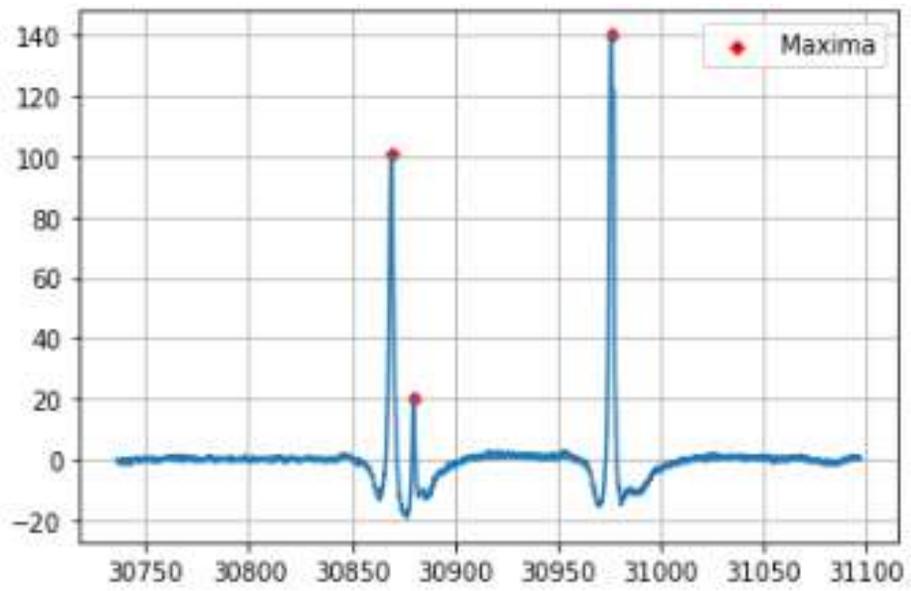


Figura 43 Prueba DIN4, sensor R7.

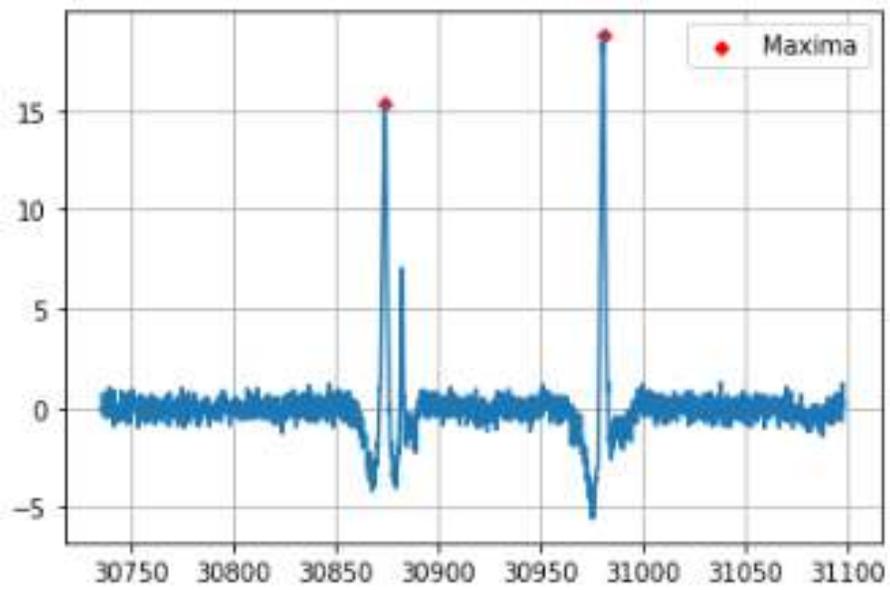


Figura 44 Prueba DIN4, sensor R8.

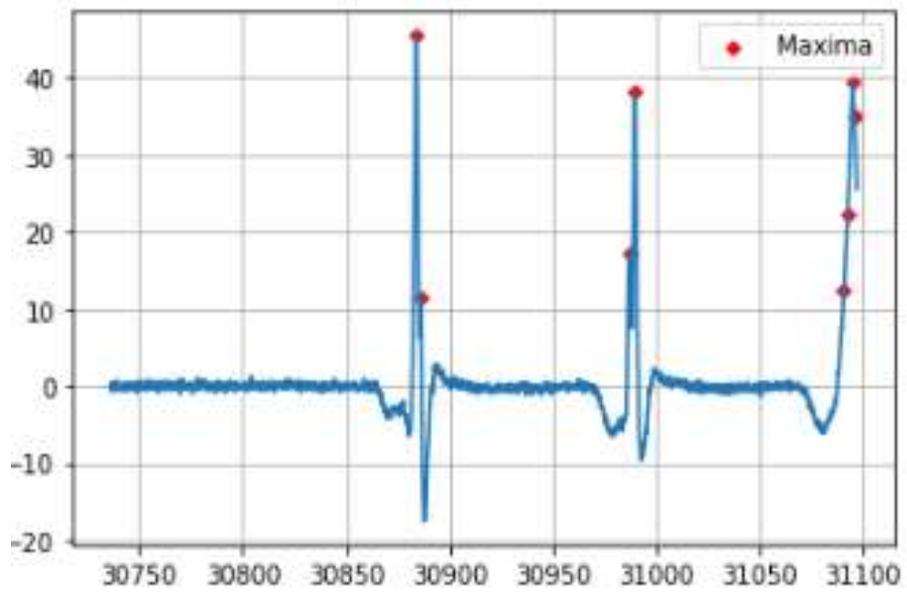


Figura 45 Prueba DIN4, sensor R11.

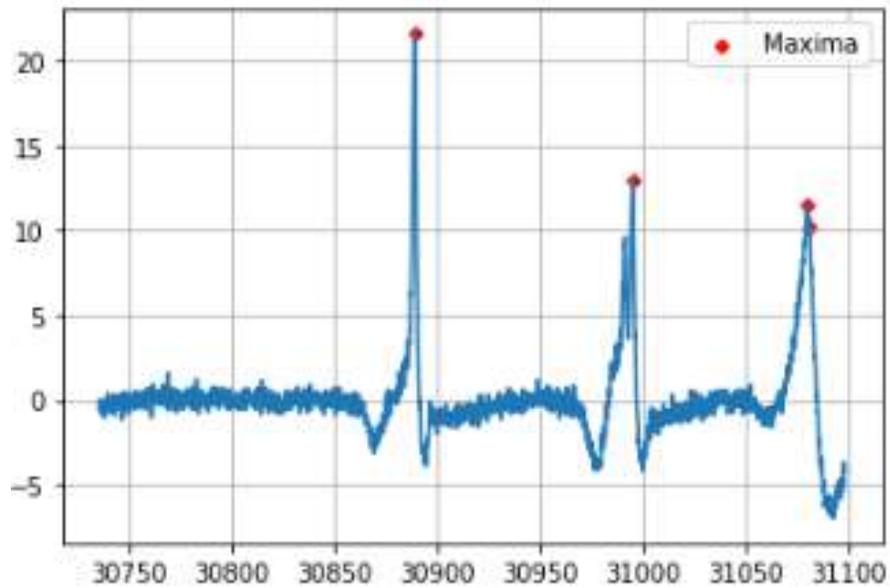


Figura 46 Prueba DIN4, sensor R12.

### 8.1.2 Amplitudes máximas

Después de aplicar el filtrado de la señal, se continuó con la búsqueda de las amplitudes máximas de deformación en cada uno de los sensores.

Este proceso se repitió para cada una de las pruebas dinámicas realizadas, obteniendo el valor correspondiente a las amplitudes máximas por evento.

A continuación, en las siguientes tablas, se presentan las deformaciones por carga viva en los sensores y el peso bruto vehicular del carril de baja velocidad y carril de alta velocidad, respectivamente.

### 8.1.2.1 Extensómetro R1

Tabla 6 Deformación por carga viva para carril de baja velocidad, sensor R1.

<b><i>Carril de baja velocidad</i></b>			
<b>Prueba</b>	<b>R1 (<math>\mu\epsilon</math>)</b>	<b>L1 (<math>\mu\epsilon</math>)</b>	<b>PBV (Ton)</b>
<b>DIN1 (primer evento)</b>	54.559078	18.74	42.5
<b>DIN1 (segundo evento)</b>	29.9948726	9.35	22.6
<b>DIN2 (primer evento)</b>	55.0999121	19.54	42.5
<b>DIN2 (segundo evento)</b>	31.7678053	9.76	22.6
<b>DIN3 (primer evento)</b>	56.3011629	18.48	42.5
<b>DIN3 (segundo evento)</b>	31.8722613	9.97	22.6
<b>DIN4 (primer evento)</b>	54.8025682	17.93	42.5
<b>DIN4 (segundo evento)</b>	22.9149713	15.55	22.6

Tabla 7 Deformación por carga viva para carril de alta velocidad, sensor R1.

<b><i>Carril de alta velocidad</i></b>			
<b><i>Prueba</i></b>	<b><i>R1 (<math>\mu\epsilon</math>)</i></b>	<b><i>L1 (<math>\mu\epsilon</math>)</i></b>	<b><i>PBV (Ton)</i></b>
<b><i>DIN1 (tercer evento)</i></b>	<i>39.8076095</i>	<i>30.83</i>	<i>39.7</i>
<b><i>DIN1 (cuarto evento)</i></b>	<i>26.4039463</i>	<i>19.37</i>	<i>25.3</i>
<b><i>DIN2 (tercer evento)</i></b>	<i>42.2353783</i>	<i>30.016</i>	<i>39.7</i>
<b><i>DIN2 (cuarto evento)</i></b>	<i>27.577885</i>	<i>20.005</i>	<i>25.3</i>
<b><i>DIN3 (tercer evento)</i></b>	<i>42.5162434</i>	<i>29.99</i>	<i>39.7</i>
<b><i>DIN3 (cuarto evento)</i></b>	<i>27.6744493</i>	<i>20.19</i>	<i>25.3</i>
<b><i>DIN4 (tercer evento)</i></b>	<i>52.9389498</i>	<i>18.14</i>	<i>39.7</i>
<b><i>DIN4 (cuarto evento)</i></b>	<i>18.4834433</i>	<i>15.55</i>	<i>25.3</i>

### 8.1.2.2 Extensómetro R2

Tabla 8 Deformación por carga viva para carril de baja velocidad, sensor R2.

<b><i>Carril de baja velocidad</i></b>			
<b>Prueba</b>	<b>R2 (<math>\mu\epsilon</math>)</b>	<b>L2 (<math>\mu\epsilon</math>)</b>	<b>PBV (Ton)</b>
<b>DIN1 (primer evento)</b>	42.402714	11.95	42.5
<b>DIN1 (segundo evento)</b>	22.3120234	6.58	22.6
<b>DIN2 (primer evento)</b>	41.0650387	13.39	42.5
<b>DIN2 (segundo evento)</b>	22.7582194	6.16	22.6
<b>DIN3 (primer evento)</b>	43.1184632	12.81	42.5
<b>DIN3 (segundo evento)</b>	22.9002673	5.65	22.6
<b>DIN4 (primer evento)</b>	42.0258631	12.57	42.5
<b>DIN4 (segundo evento)</b>	18.503226	13.78	22.6

Tabla 9 Deformación por carga viva para carril de alta velocidad, sensor R2.

<b><i>Carril de alta velocidad</i></b>			
<b>Prueba</b>	<b>R2 (<math>\mu\epsilon</math>)</b>	<b>L2 (<math>\mu\epsilon</math>)</b>	<b>PBV (Ton)</b>
<b>DIN1 (tercer evento)</b>	25.4502987	20.88	39.7
<b>DIN1 (cuarto evento)</b>	17.3285482	13.07	25.3
<b>DIN2 (tercer evento)</b>	30.2810977	21.36	39.7
<b>DIN2 (cuarto evento)</b>	18.3794983	13.51	25.3
<b>DIN3 (tercer evento)</b>	29.9054569	21.39	39.7
<b>DIN3 (cuarto evento)</b>	18.3258053	12.69	25.3
<b>DIN4 (tercer evento)</b>	39.6545752	12.12	39.7
<b>DIN4 (cuarto evento)</b>	10.8409071	9.64	25.3

### 8.1.2.3 Extensómetro R4

Tabla 10 Deformación por carga viva para carril de baja velocidad, sensor R4.

<b><i>Carril de baja velocidad</i></b>			
<b>Prueba</b>	<b>R4 (με)</b>	<b>L4 (με)</b>	<b>PBV (Ton)</b>
<b>DIN1 (primer evento)</b>	47.6991338	5.75	42.5
<b>DIN1 (segundo evento)</b>	26.3446302	2.93	22.6
<b>DIN2 (primer evento)</b>	47.3593406	5.25	42.5
<b>DIN2 (segundo evento)</b>	23.0635657	2.63	22.6
<b>DIN3 (primer evento)</b>	47.6033601	4.82	42.5
<b>DIN3 (segundo evento)</b>	24.9547627	2.81	22.6
<b>DIN4 (primer evento)</b>	45.3994189	4.52	42.5
<b>DIN4 (segundo evento)</b>	25.7717005	5.87	22.6

Tabla 11 Deformación por carga viva para carril de alta velocidad, sensor R4.

<b><i>Carril de alta velocidad</i></b>			
<b>Prueba</b>	<b>R4 (με)</b>	<b>L4 (με)</b>	<b>PBV (Ton)</b>
<b>DIN1 (tercer evento)</b>	34.6320977	8.17	39.7
<b>DIN1 (cuarto evento)</b>	21.5479314	5.26	25.3
<b>DIN2 (tercer evento)</b>	34.925441	8.28	39.7
<b>DIN2 (cuarto evento)</b>	20.0787686	4.96	25.3
<b>DIN3 (tercer evento)</b>	34.8789522	7.85	39.7
<b>DIN3 (cuarto evento)</b>	19.7472803	6.05	25.3
<b>DIN4 (tercer evento)</b>	42.3895852	4.2	39.7
<b>DIN4 (cuarto evento)</b>	1.31970389	2.24	25.3

### 8.1.2.4 Extensómetro R5

Tabla 12 Deformación por carga viva para carril de baja velocidad, sensor R5.

<b><i>Carril de baja velocidad</i></b>			
<b>Prueba</b>	<b>R5 (με)</b>	<b>L5 (με)</b>	<b>PBV (Ton)</b>
<b>DIN1 (primer evento)</b>	34.7284264	8.53	42.5
<b>DIN1 (segundo evento)</b>	20.9271944	4.14	22.6
<b>DIN2 (primer evento)</b>	35.5357239	8.73	42.5
<b>DIN2 (segundo evento)</b>	20.2151904	4.21	22.6
<b>DIN3 (primer evento)</b>	35.935343	8.95	42.5
<b>DIN3 (segundo evento)</b>	20.4979825	4.26	22.6
<b>DIN4 (primer evento)</b>	35.2786861	7.7	42.5
<b>DIN4 (segundo evento)</b>	4.50547711	7	22.6

Tabla 13 Deformación por carga viva para carril de alta velocidad, sensor R5.

<b><i>Carril de alta velocidad</i></b>			
<b>Prueba</b>	<b>R5 (με)</b>	<b>L5 (με)</b>	<b>PBV (Ton)</b>
<b>DIN1 (tercer evento)</b>	27.3971091	13.92	39.7
<b>DIN1 (cuarto evento)</b>	18.0405513	9.07	25.3
<b>DIN2 (tercer evento)</b>	29.9307172	14.65	39.7
<b>DIN2 (cuarto evento)</b>	18.5568804	10.12	25.3
<b>DIN3 (tercer evento)</b>	28.1354496	14.09	39.7
<b>DIN3 (cuarto evento)</b>	18.5863444	10.85	25.3
<b>DIN4 (tercer evento)</b>	18.163099	6.8	39.7
<b>DIN4 (cuarto evento)</b>	33.3508602	5.19	25.3

### 8.1.2.5 Extensómetro R6

Tabla 14 Deformación por carga viva para carril de baja velocidad, sensor R6.

<b><i>Carril de baja velocidad</i></b>			
Prueba	R6 (μϵ)	L6 (μϵ)	PBV (Ton)
<b>DIN1 (primer evento)</b>	31.625845	19.97	42.5
<b>DIN1 (segundo evento)</b>	16.9649617	10.54	22.6
<b>DIN2 (primer evento)</b>	33.3454188	22.94	42.5
<b>DIN2 (segundo evento)</b>	19.2904788	12.48	22.6
<b>DIN3 (primer evento)</b>	33.5806937	23.52	42.5
<b>DIN3 (segundo evento)</b>	20.0087757	13.67	22.6
<b>DIN4 (primer evento)</b>	33.3949021	19.94	42.5
<b>DIN4 (segundo evento)</b>	11.4321779	18.064	22.6

Tabla 15 Deformación por carga viva para carril de alta velocidad, sensor R6.

<b><i>Carril de alta velocidad</i></b>			
Prueba	R6 (μϵ)	L6 (μϵ)	PBV (Ton)
<b>DIN1 (tercer evento)</b>	23.7843291	28.48	39.7
<b>DIN1 (cuarto evento)</b>	14.2524497	18.84	25.3
<b>DIN2 (tercer evento)</b>	26.0857338	31.68	39.7
<b>DIN2 (cuarto evento)</b>	15.9309347	19.82	25.3
<b>DIN3 (tercer evento)</b>	26.0719545	31.6	39.7
<b>DIN3 (cuarto evento)</b>	15.6043687	21.17	25.3
<b>DIN4 (tercer evento)</b>	33.6046719	25.25	39.7
<b>DIN4 (cuarto evento)</b>	21.6933211	23.5	25.3

### 8.1.2.6 Extensómetro R7

Tabla 16 Deformación por carga viva para carril de baja velocidad, sensor R7.

<b><i>Carril de baja velocidad</i></b>			
Prueba	R7 (με)	L7 (με)	PBV (Ton)
<b>DIN1 (primer evento)</b>	94.5136509	39.45	42.5
<b>DIN1 (segundo evento)</b>	40.2163575	19.42	22.6
<b>DIN2 (primer evento)</b>	97.3060945	39.85	42.5
<b>DIN2 (segundo evento)</b>	41.36593	21.11	22.6
<b>DIN3 (primer evento)</b>	95.2878376	39.487	42.5
<b>DIN3 (segundo evento)</b>	42.4483465	22.18	22.6
<b>DIN4 (primer evento)</b>	100.633134	38.11	42.5
<b>DIN4 (segundo evento)</b>	20.0642227	25.68	22.6

Tabla 17 Deformación por carga viva para carril de alta velocidad, sensor R7.

<b><i>Carril de alta velocidad</i></b>			
Prueba	R7 (με)	L7 (με)	PBV (Ton)
<b>DIN1 (tercer evento)</b>	66.7083396	57.88	39.7
<b>DIN1 (cuarto evento)</b>	33.947302	35.19	25.3
<b>DIN2 (tercer evento)</b>	71.638954	57.23	39.7
<b>DIN2 (cuarto evento)</b>	37.3821355	36.29	25.3
<b>DIN3 (tercer evento)</b>	71.082699	55.25	39.7
<b>DIN3 (cuarto evento)</b>	38.109593	37.15	25.3
<b>DIN4 (tercer evento)</b>	140.027118	72.58	39.7
<b>DIN4 (cuarto evento)</b>	Sin datos	Sin datos	25.3

### 8.1.2.7 Extensómetro R8

Tabla 18 Deformación por carga viva para carril de baja velocidad, sensor R8.

<i>Carril de baja velocidad</i>			
Prueba	R8 (με)	L8 (με)	PBV (Ton)
<b>DIN1 (primer evento)</b>	8.72458469	Sin datos	42.5
<b>DIN1 (segundo evento)</b>	8.8428215	Sin datos	22.6
<b>DIN2 (primer evento)</b>	15.5490158	Sin datos	42.5
<b>DIN2 (segundo evento)</b>	8.49875904	Sin datos	22.6
<b>DIN3 (primer evento)</b>	15.1291791	Sin datos	42.5
<b>DIN3 (segundo evento)</b>	8.20541532	Sin datos	22.6
<b>DIN4 (primer evento)</b>	15.3723185	Sin datos	42.5
<b>DIN4 (segundo evento)</b>	7.05230529	Sin datos	22.6

Tabla 19 Deformación por carga viva para carril de alta velocidad, sensor R8.

<i>Carril de alta velocidad</i>			
Prueba	R8 (με)	L8 (με)	PBV (Ton)
<b>DIN1 (tercer evento)</b>	11.1599352	Sin datos	39.7
<b>DIN1 (cuarto evento)</b>	8.57347795	Sin datos	25.3
<b>DIN2 (tercer evento)</b>	12.4549303	Sin datos	39.7
<b>DIN2 (cuarto evento)</b>	8.08608587	Sin datos	25.3
<b>DIN3 (tercer evento)</b>	12.2383789	Sin datos	39.7
<b>DIN3 (cuarto evento)</b>	6.9126472	Sin datos	25.3
<b>DIN4 (tercer evento)</b>	18.7566711	Sin datos	39.7
<b>DIN4 (cuarto evento)</b>	Sin datos	Sin datos	25.3

### 8.1.2.8 Extensómetro R11

Tabla 20 Deformación por carga viva para carril de baja velocidad, sensor R11.

<b><i>Carril de baja velocidad</i></b>			
<b>Prueba</b>	<b>R11 (με)</b>	<b>L11 (με)</b>	<b>PBV (Ton)</b>
<b>DIN1 (primer evento)</b>	44.187247	3.09	42.5
<b>DIN1 (segundo evento)</b>	24.2207705	1.77	22.6
<b>DIN2 (primer evento)</b>	45.260313	3.04	42.5
<b>DIN2 (segundo evento)</b>	24.8708771	1.764	22.6
<b>DIN3 (primer evento)</b>	44.3226623	2.9	42.5
<b>DIN3 (segundo evento)</b>		2.08	22.6
<b>DIN4 (primer evento)</b>	45.48928	2.79	42.5
<b>DIN4 (segundo evento)</b>	11.6159516	Sin datos	22.6

Tabla 21 Deformación por carga viva para carril de alta velocidad, sensor R11.

<b><i>Carril de alta velocidad</i></b>			
<b>Prueba</b>	<b>R11 (με)</b>	<b>L11 (με)</b>	<b>PBV (Ton)</b>
<b>DIN1 (tercer evento)</b>	33.1911687	4.53	39.7
<b>DIN1 (cuarto evento)</b>	20.7187179	3.12	25.3
<b>DIN2 (tercer evento)</b>	34.8035075	4.28	39.7
<b>DIN2 (cuarto evento)</b>	21.4366896	2.07	25.3
<b>DIN3 (tercer evento)</b>	33.8874573	4.3	39.7
<b>DIN3 (cuarto evento)</b>	21.9701897	2.69	25.3
<b>DIN4 (tercer evento)</b>	17.1911052	3.23	39.7
<b>DIN4 (cuarto evento)</b>	38.0981908	Sin datos	25.3

### 8.1.2.9 Extensómetro R12

Tabla 22 Deformación por carga viva para carril de baja velocidad, sensor R12.

<b><i>Carril de baja velocidad</i></b>			
<b>Prueba</b>	<b>R12 (με)</b>	<b>L12 (με)</b>	<b>PBV (Ton)</b>
<b>DIN1 (primer evento)</b>	14.9970734	22.51	42.5
<b>DIN1 (segundo evento)</b>	8.61340585	12.27	22.6
<b>DIN2 (primer evento)</b>	16.0513861	24.53	42.5
<b>DIN2 (segundo evento)</b>	8.24976351	14.13	22.6
<b>DIN3 (primer evento)</b>	15.8654185	24.65	42.5
<b>DIN3 (segundo evento)</b>	8.85772803	13.81	22.6
<b>DIN4 (primer evento)</b>	21.5840085	40.21	42.5
<b>DIN4 (segundo evento)</b>	0	26.71	22.6

Tabla 23 Deformación por carga viva para carril de alta velocidad, sensor R12.

<b><i>Carril de alta velocidad</i></b>			
<b>Prueba</b>	<b>R12 (με)</b>	<b>L12 (με)</b>	<b>PBV (Ton)</b>
<b>DIN1 (tercer evento)</b>	12.2118964	33.98	39.7
<b>DIN1 (cuarto evento)</b>	8.05904291	22.95	25.3
<b>DIN2 (tercer evento)</b>	12.0217942	35.083	39.7
<b>DIN2 (cuarto evento)</b>	8.51281642	24.19	25.3
<b>DIN3 (tercer evento)</b>	12.3918705	35.07	39.7
<b>DIN3 (cuarto evento)</b>	8.57827425	22.66	25.3
<b>DIN4 (tercer evento)</b>	11.4667421	Sin datos	39.7
<b>DIN4 (cuarto evento)</b>	Sin datos	Sin datos	25.3

### 8.1.3 Determinación de velocidad

En las siguientes tablas, se determina la velocidad a la que circularon los vehículos de configuración C3 a partir de la amplitud máxima y el tiempo por efecto de carga viva.

#### 8.1.3.1 Prueba DIN1

Tabla 24 Determinación de velocidad – DIN1- Primer evento.

<i>DIN1_C3_20kmh (primer evento)</i>										
Sensor	Tiempo (amplitud máxima)	Delta tiempo (s)	Distancia entre sensores (m)	Velocidad estimada (m/s)	Velocidad estimada (km/h)	Tiempo por efecto de la carga viva (s)	Tant (s)	Tiempo antes (s)	Tdesp(s)	Tiempo después (s)
<b>R1</b>	23559.1043	0	0	No aplica	No aplica	<b>5.584093</b>	23555.79226	3.312055	23561.3763	2.272038
<b>R2</b>	23564.6324	5.528091	35	6.33	22.8	<b>3.65606</b>	23562.71237	1.920031	23566.3684	1.736029
<b>R3</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R4</b>	23570.3525	5.720095	35	6.12	22.0	<b>3.688058</b>	23568.26447	2.088032	23571.9525	1.600026
<b>R5</b>	23575.6806	5.328088	35	6.57	23.6	<b>4.920081</b>	23572.76854	2.912048	23577.6886	2.008033
<b>R6</b>	23580.3207	4.640077	31.5	6.79	24.4	<b>5.992099</b>	23576.8566	3.464058	23582.8487	2.528041
<b>R7</b>	23585.9128	5.592092	31.5	5.63	20.3	<b>6.416106</b>	23583.04071	2.872047	23589.4568	3.544059
<b>R8</b>	23591.4088	5.496091	31.5	5.73	20.6	<b>10.064166</b>	23588.32879	3.080051	23598.393	6.984115
<b>R9</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R10</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R11</b>	23602.417	11.008182	70	6.36	22.9	<b>4.24007</b>	23600.06499	2.352039	23604.3051	1.888031
<b>R12</b>	23607.4011	4.984082	35	7.02	25.3	<b>7.112118</b>	23603.04904	4.352072	23610.1612	2.760046

Tabla 25 Determinación de velocidad – DIN1- Segundo evento.

<i>DIN1_C3_20kmh (segundo evento)</i>										
Sensor	Tiempo (amplitud máxima)	Delta tiempo (s)	Distancia entre sensores (m)	Velocidad estimada (m/s)	Velocidad estimada (km/h)	Tiempo por efecto de la carga viva (s)	Tant (s)	Tiempo antes (s)	Tdesp(s)	Tiempo después (s)
<b>R1</b>	23636.4016	0	0	No aplica	No aplica	<b>5.480091</b>	23633.45754	2.944049	23638.9376	2.536042
<b>R2</b>	23642.4017	6.000099	35	5.83	21.0	<b>4.416072</b>	23640.46566	1.936031	23644.8817	2.480041
<b>R3</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R4</b>	23648.1858	5.784096	35	6.05	21.8	<b>4.000066</b>	23646.28175	1.904031	23650.2818	2.096035
<b>R5</b>	23653.7219	5.536092	35	6.32	22.8	<b>5.192085</b>	23651.19383	2.528042	23656.3859	2.664043
<b>R6</b>	23659.051	5.328087	31.5	5.91	21.3	<b>6.504108</b>	23655.68991	3.360055	23662.1941	3.144053
<b>R7</b>	23664.8741	5.824097	31.5	5.41	19.5	<b>7.376121</b>	23661.57001	3.304054	23668.9461	4.072067
<b>R8</b>	23670.1701	5.296087	31.5	5.95	21.4	<b>8.528141</b>	23667.63411	2.536041	23676.1622	5.9921
<b>R9</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R10</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R11</b>	23680.8903	10.720178	70	6.53	23.5	<b>3.872064</b>	23679.1623	1.728029	23683.0344	2.144035
<b>R12</b>	23685.6184	4.728078	35	7.40	26.6	<b>7.584142</b>	23683.02636	2.592043	23690.6105	4.992099

Tabla 26 Determinación de velocidad – DIN1- Tercer evento.

<i>DIN1_C3_20kmh (tercer evento)</i>										
Sensor	Tiempo (amplitud máxima)	Delta tiempo (s)	Distancia entre sensores (m)	Velocidad estimada (m/s)	Velocidad estimada (km/h)	Tiempo por efecto de la carga viva (s)	Tant (s)	Tiempo antes (s)	Tdesp(s)	Tiempo después (s)
<b>R1</b>	23711.5308	0	0	No aplica	No aplica	<b>5.624093</b>	23708.44278	3.08805	23714.0669	2.536043
<b>R2</b>	23717.4349	5.904099	35	5.93	21.3	<b>3.840064</b>	23715.14689	2.288038	23718.9878	1.552026
<b>R3</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R4</b>	23722.515	5.080084	35	6.89	24.8	<b>3.62406</b>	23720.63498	1.880031	23724.2591	1.744029
<b>R5</b>	23727.4191	4.904081	35	7.14	25.7	<b>4.976083</b>	23724.77905	2.640044	23729.7551	2.336039
<b>R6</b>	23732.2752	4.85608	31.5	6.49	23.4	<b>5.640093</b>	23729.09912	3.176052	23734.7392	2.464041
<b>R7</b>	23737.2353	4.960083	31.5	6.35	22.9	<b>6.128102</b>	23734.73922	2.496042	23740.8673	3.632061
<b>R8</b>	23741.9633	4.728078	31.5	6.66	24.0	<b>8.216136</b>	23739.7393	2.224037	23747.9554	5.992099
<b>R9</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R10</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R11</b>	23810.4125	68.449135	70	1.02	3.7	<b>7.496124</b>	23808.90845	1.504025	23816.4046	5.992099
<b>R12</b>	23813.7165	3.304055	35	10.59	38.1	<b>7.520125</b>	23812.1885	1.528026	23819.7086	5.992099

Tabla 27 Determinación de velocidad – DIN1- Cuarto evento.

<i>DIN1_C3_20kmh (cuarto evento)</i>										
Sensor	Tiempo (amplitud máxima)	Delta tiempo (s)	Distancia entre sensores (m)	Velocidad estimada (m/s)	Velocidad estimada (km/h)	Tiempo por efecto de la carga viva (s)	Tant (s)	Tiempo antes (s)	Tdesp(s)	Tiempo después (s)
<b>R1</b>	23777.3879	0	0	No aplica	No aplica	<b>4.672078</b>	23775.01988	2.368039	23779.692	2.304039
<b>R2</b>	23781.5	4.112068	35	8.51	30.6	<b>3.70012</b>	23780.29197	1.20802	23783.9921	2.4921
<b>R3</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R4</b>	23786.1801	4.680078	35	7.48	26.9	<b>3.496058</b>	23784.73205	1.448024	23788.2281	2.048034
<b>R5</b>	23790.5481	4.368073	35	8.01	28.8	<b>4.152069</b>	23788.61211	1.936033	23792.7642	2.216036
<b>R6</b>	23794.4762	3.928065	31.5	8.02	28.9	<b>5.280087</b>	23792.12417	2.352039	23797.4043	2.928048
<b>R7</b>	23798.5163	4.040067	31.5	7.80	28.1	<b>7.504126</b>	23796.30024	2.216037	23803.8044	5.288089
<b>R8</b>	23802.3643	3.848064	31.5	8.19	29.5	<b>7.432123</b>	23800.92431	1.440025	23808.3564	5.992098
<b>R9</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R10</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R11</b>	23810.4125	8.048133	70	8.70	31.3	<b>7.496124</b>	23808.90845	1.504025	23816.4046	5.992099
<b>R12</b>	23813.7165	3.304055	35	10.59	38.1	<b>5.520125</b>	23812.18856	1.528026	23817.7086	3.992099

### 8.1.3.2 Prueba DIN2

Tabla 28 Determinación de velocidad – DIN2- Primer evento.

<i>DIN2_C3_60kmh (primer evento)</i>										
Sensor	Tiempo (amplitud máxima)	Delta tiempo (s)	Distancia entre sensores (m)	Velocidad estimada (m/s)	Velocidad estimada (km/h)	Tiempo por efecto de la carga viva (s)	Tant (s)	Tiempo antes (s)	Tdesp(s)	Tiempo después (s)
<b>R1</b>	25386.583	0	0	No aplica	No aplica	<b>3.976067</b>	25384.46299	2.120036	25388.4391	1.856031
<b>R2</b>	25390.5351	3.952068	35	8.86	31.9	<b>2.488042</b>	25389.27907	1.256022	25391.7671	1.23202
<b>R3</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R4</b>	25394.7992	4.264072	35	8.21	29.5	<b>2.784048</b>	25393.27114	1.528027	25396.0552	1.256021
<b>R5</b>	25398.6712	3.872065	35	9.04	32.5	<b>3.768065</b>	25396.49519	2.176037	25400.2633	1.592028
<b>R6</b>	25402.0233	3.352058	31.5	9.40	33.8	<b>4.16807</b>	25399.59925	2.424041	25403.7673	1.744029
<b>R7</b>	25405.4873	3.464059	31.5	9.09	32.7	<b>4.024068</b>	25403.75132	1.736037	25407.7754	2.288038
<b>R8</b>	25408.3594	2.872048	31.5	10.97	39.5	<b>4.944085</b>	25406.97537	1.384024	25411.9195	3.560061
<b>R9</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos

<b>R10</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R11</b>	25414.3515	5.992102	70	11.68	42.1	<b>2.136036</b>	25413.18348	1.16802	25415.3195	0.968016
<b>R12</b>	25416.7595	2.408041	35	14.53	52.3	<b>3.952067</b>	25414.8875	1.872032	25418.8396	2.080035

Tabla 29 Determinación de velocidad – DIN2- Segundo evento.

<b>DIN2_C3_60kmh (segundo evento)</b>										
<b>Sensor</b>	<b>Tiempo (amplitud máxima)</b>	<b>Delta tiempo (s)</b>	<b>Distancia entre sensores (m)</b>	<b>Velocidad estimada (m/s)</b>	<b>Velocidad estimada (km/h)</b>	<b>Tiempo por efecto de la carga viva (s)</b>	<b>Tant (s)</b>	<b>Tiempo antes (s)</b>	<b>Tdesp(s)</b>	<b>Tiempo después (s)</b>
<b>R1</b>	25442.56	0	0	No aplica	No aplica	<b>3.144053</b>	25441.09595	1.464024	25444.24	1.680029
<b>R2</b>	25445.344	2.784048	35	12.57	45.3	<b>2.784115</b>	25444.55201	0.792013	25447.3361	1.992102
<b>R3</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R4</b>	25448.2241	2.880049	35	12.15	43.7	<b>1.864032</b>	25447.36806	0.856015	25449.2321	1.008017
<b>R5</b>	25450.8721	2.648045	35	13.22	47.6	<b>2.536043</b>	25449.6961	1.17602	25452.2321	1.360023
<b>R6</b>	25453.3602	2.488042	31.5	12.66	45.6	<b>3.70413</b>	25451.64813	1.712028	25455.3523	1.992102
<b>R7</b>	25456.0242	2.664045	31.5	11.82	42.6	<b>3.896067</b>	25454.61618	1.408024	25458.5122	2.488043
<b>R8</b>	25458.2322	2.208038	31.5	14.27	51.4	<b>3.248055</b>	25457.47223	0.760013	25460.7203	2.488042
<b>R9</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R10</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R11</b>	25463.4963	5.264089	70	13.30	47.9	<b>1.960034</b>	25462.56831	0.928016	25464.5283	1.032018
<b>R12</b>	25465.7124	2.216038	35	15.79	56.9	<b>3.136121</b>	25464.56835	1.144019	25467.7045	1.992102

Tabla 30 Determinación de velocidad – DIN2- Tercer evento.

<b>DIN2_C3_60kmh (tercer evento)</b>										
<b>Sensor</b>	<b>Tiempo (amplitud máxima)</b>	<b>Delta tiempo (s)</b>	<b>Distancia entre sensores (m)</b>	<b>Velocidad estimada (m/s)</b>	<b>Velocidad estimada (km/h)</b>	<b>Tiempo por efecto de la carga viva (s)</b>	<b>Tant (s)</b>	<b>Tiempo antes (s)</b>	<b>Tdesp(s)</b>	<b>Tiempo después (s)</b>
<b>R1</b>	25505.201	0	0	No aplica	No aplica	<b>3.592061</b>	25503.49701	1.704031	25507.0891	1.88803
<b>R2</b>	25508.4171	3.216053	35	10.88	39.2	<b>2.232037</b>	25507.40908	1.008017	25509.6411	1.22402
<b>R3</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R4</b>	25511.8172	3.400057	35	10.29	37.1	<b>2.288039</b>	25510.68113	1.136019	25512.9692	1.15202
<b>R5</b>	25514.8412	3.024052	35	11.57	41.7	<b>2.92805</b>	25513.31318	1.528026	25516.2412	1.400024
<b>R6</b>	25517.5692	2.728046	31.5	11.55	41.6	<b>3.600061</b>	25515.49721	2.072035	25519.0973	1.528026
<b>R7</b>	25520.3453	2.776048	31.5	11.35	40.8	<b>3.224054</b>	25519.11328	1.232021	25522.3373	1.992033
<b>R8</b>	25522.6733	2.328039	31.5	13.53	48.7	<b>3.560062</b>	25521.60132	1.072019	25525.1614	2.488043

<b>R9</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R10</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R11</b>	25527.577 4	4.90408 3	70	14.27	51.4	<b>1.76803 1</b>	25526.7054	0.87201 5	25528.473 4	0.89601 6
<b>R12</b>	25529.577 5	2.00003 4	35	17.50	63.0	<b>3.12013 8</b>	25528.3774 3	1.20002	25531.497 6	1.92011 8

Tabla 31 Determinación de velocidad – DIN2- Cuarto evento.

<b>DIN2_C3_60kmh (cuarto evento)</b>										
<b>Senso r</b>	<b>Tiempo (amplitud máxima)</b>	<b>Delta tiempo (s)</b>	<b>Distanci a entre sensore s (m)</b>	<b>Velocida d estimad a (m/s)</b>	<b>Velocida d estimad a (km/h)</b>	<b>Tiempo por efecto de la carga viva (s)</b>	<b>Tant (s)</b>	<b>Tiempo antes (s)</b>	<b>Tdesp(s)</b>	<b>Tiempo después (s)</b>
<b>R1</b>	25563.074	0	0	No aplica	No aplica	<b>3.54406</b>	25561.418	1.65602 8	25564.962 1	1.88803 2
<b>R2</b>	25565.906 1	2.83204 9	35	12.36	44.5	<b>3.84811 7</b>	25565.0500 6	0.85601 6	25568.898 2	2.99210 1
<b>R3</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R4</b>	25568.914 1	3.00805 1	35	11.64	41.9	<b>2.03203 5</b>	25568.0661 1	0.84801 5	25570.098 1	1.18402
<b>R5</b>	25571.682 2	2.76804 7	35	12.64	45.5	<b>2.76004 8</b>	25570.3861 5	1.29602 3	25573.146 2	1.46402 5
<b>R6</b>	25574.186 2	2.50404 2	31.5	12.58	45.3	<b>3.71206 3</b>	25572.4501 8	1.73602 9	25576.162 2	1.97603 4
<b>R7</b>	25576.778 3	2.59204 4	31.5	12.15	43.7	<b>3.92005 8</b>	25575.3462 3	1.43202 4	25579.266 3	2.48803 4
<b>R8</b>	25579.146 3	2.36804 1	31.5	13.30	47.9	<b>3.36805 7</b>	25578.2662 8	0.88001 5	25581.634 3	2.48804 2
<b>R9</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R10</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R11</b>	25584.010 4	4.86408 2	70	14.39	51.8	<b>1.91203 2</b>	25583.1463 7	0.86401 4	25585.058 4	1.04801 8
<b>R12</b>	25586.082 4	2.07203 5	35	16.89	60.8	<b>3.60806 1</b>	25584.9624	1.12001 8	25588.570 5	2.48804 3

### 8.1.3.3 Prueba DIN3

Tabla 32 Determinación de velocidad – DIN3- Primer evento.

<b>DIN3_80kmh (primer evento)</b>										
<b>Senso r</b>	<b>Tiempo (amplitud máxima)</b>	<b>Delta tiempo (s)</b>	<b>Distanci a entre sensore s (m)</b>	<b>Velocida d estimad a (m/s)</b>	<b>Velocida d estimad a (km/h)</b>	<b>Tiempo por efecto de la carga viva (s)</b>	<b>Tant (s)</b>	<b>Tiempo antes (s)</b>	<b>Tdesp(s)</b>	<b>Tiempo después (s)</b>
<b>R1</b>	28657.967 7	0	0	No aplica	No aplica	<b>3.69606 6</b>	28655.9756 5	1.99203 6	28659.671 7	1.70403
<b>R2</b>	28661.495 8	3.52806 3	35	9.92	35.7	<b>2.33604 5</b>	28660.4077 3	1.08802	28662.743 8	1.24802 5
<b>R3</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos

<b>R4</b>	28665.215 8	3.72006 6	35	9.41	33.9	<b>2.41604</b> 3	28663.9358	1.28002 3	28666.351 8	1.13602
<b>R5</b>	28668.735 9	3.52006 3	35	9.94	35.8	<b>3.40806</b> 1	28666.7998 5	1.93603 5	28670.207 9	1.47202 6
<b>R6</b>	28671.719 9	2.98405 3	31.5	10.56	38.0	<b>3.70406</b> 8	28669.6079	2.11203 8	28673.312	1.59203
<b>R7</b>	28674.864	3.14405 7	31.5	10.02	36.1	<b>3.77606</b> 7	28673.3839 6	1.48002 7	28677.16	2.29604
<b>R8</b>	28678.616 1	3.75206 6	31.5	8.40	30.2	<b>2.79208</b> 6	28676.3120 2	2.30404 1	28679.104 1	0.48804 5
<b>R9</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R10</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R11</b>	28683.368 1	4.75208 4	70	14.73	53.0	<b>2.05603</b> 6	28682.2401 2	1.12801 9	28684.296 2	0.92801 7
<b>R12</b>	28685.736 2	2.36804 3	35	14.78	53.2	<b>3.72006</b> 6	28684.0401 5	1.69603	28687.760 2	2.02403 6

Tabla 33 Determinación de velocidad – DIN3- Segundo evento.

<i>DIN3_80kmh (segundo evento)</i>										
Sensor	Tiempo (amplitud máxima)	Delta tiempo (s)	Distancia entre sensores (m)	Velocidad estimada (m/s)	Velocidad estimada (km/h)	Tiempo por efecto de la carga viva (s)	Tant (s)	Tiempo antes (s)	Tdesp(s)	Tiempo después (s)
<b>R1</b>	28709.896 6	0	0	No aplica	No aplica	<b>3.07205</b> 5	28708.5365 9	1.36002 5	28711.608 6	1.71203
<b>R2</b>	28712.344 7	2.44804 3	35	14.30	51.5	<b>3.27205</b> 8	28711.5606 5	0.78401 3	28714.832 7	2.48804 5
<b>R3</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R4</b>	28714.816 7	2.47204 2	35	14.16	51.0	<b>1.71203</b> 1	28714.0806 9	0.73601 1	28715.792 7	0.97602
<b>R5</b>	28717.152 7	2.33604 5	35	14.98	53.9	<b>2.33603</b> 5	28716.0727 3	1.08002	28718.408 8	1.25601 5
<b>R6</b>	28719.104 8	1.95203 4	31.5	16.14	58.1	<b>3.46406</b> 1	28717.8887 6	1.21602 1	28721.352 8	2.24804
<b>R7</b>	28721.352 8	2.24804	31.5	14.01	50.4	<b>3.57606</b> 4	28720.2648	1.08801 9	28723.840 9	2.48804 5
<b>R8</b>	28723.096 9	1.74403 1	31.5	18.06	65.0	<b>2.10405</b> 6	28722.4808 4	0.61601 1	28724.584 9	1.48804 5
<b>R9</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R10</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R11</b>	28727.200 9	4.10407 4	70	17.06	61.4	<b>1.99602</b> 7	28726.5129 1	0.68801 3	28728.508 9	1.30801 4
<b>R12</b>	28729.081	1.88003 3	35	18.62	67.0	<b>3.41606</b> 1	28728.1529 4	0.92801 6	28731.569	2.48804 5

Tabla 34 Determinación de velocidad – DIN3- Tercer evento.

<i>DIN3_80kmh (tercer evento)</i>										
Sensor	Tiempo (amplitud máxima)	Delta tiempo (s)	Distancia entre sensores (m)	Velocidad estimada (m/s)	Velocidad estimada (km/h)	Tiempo por efecto de la carga viva (s)	Tant (s)	Tiempo antes (s)	Tdesp(s)	Tiempo después (s)
<b>R1</b>	28833.05 08	0	0	No aplica	No aplica	<b>2.92805</b> 2	28831.778 79	1.27202 2	28834.70 68	1.65603

<b>R2</b>	28777.31 38	- 55.73699 5	35	-0.63	-2.3	<b>2.12003</b> <b>9</b>	28776.377 8	0.93601 8	28778.49 78	1.18402 1
<b>R3</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R4</b>	28780.55 39	3.240057	35	10.80	38.9	<b>2.15203</b> <b>9</b>	28779.513 86	1.04001 8	28781.66 59	1.11202 1
<b>R5</b>	28783.50 59	2.952053	35	11.86	42.7	<b>2.93605</b> <b>2</b>	28781.985 9	1.52002 6	28784.92 2	1.41602 6
<b>R6</b>	28786.15 4	2.648048	31.5	11.90	42.8	<b>3.36006</b>	28784.257 94	1.89603 4	28787.61 8	1.46402 6
<b>R7</b>	28788.77 8	2.624046	31.5	12.00	43.2	<b>3.24005</b> <b>8</b>	28787.562	1.21602 2	28790.80 21	2.02403 6
<b>R8</b>	28791.13 01	2.352041	31.5	13.39	48.2	<b>3.48806</b> <b>3</b>	28790.130 05	1.00001 7	28793.61 81	2.48804 6
<b>R9</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R10</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R11</b>	28796.01 02	4.880088	70	14.34	51.6	<b>2.86403</b> <b>4</b>	28795.074 14	0.93601 7	28797.93 82	1.92801 7
<b>R12</b>	28797.95 42	1.944035	35	18.00	64.8	<b>3.00808</b> <b>9</b>	28797.466 16	0.48802 6	28800.47 43	2.52006 3

Tabla 35 Determinación de velocidad – DIN3- Cuarto evento.

<i>DIN3_80kmh (cuarto evento)</i>										
Sensor	Tiempo (amplitud máxima)	Delta tiempo (s)	Distancia entre sensores (m)	Velocidad estimada (m/s)	Velocidad estimada (km/h)	Tiempo por efecto de la carga viva (s)	Tant (s)	Tiempo antes (s)	Tdesp(s)	Tiempo después (s)
<b>R1</b>	28833.050 8	0	0	No aplica	No aplica	<b>2.92805</b> <b>2</b>	28831.7787 9	1.27202 2	28834.706 8	1.65603
<b>R2</b>	28835.514 9	2.46404 4	35	14.20	51.1	<b>3.27205</b> <b>8</b>	28834.7308 5	0.78401 3	28838.002 9	2.48804 5
<b>R3</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R4</b>	28838.138 9	2.62404 8	35	13.34	48.0	<b>2.06003</b> <b>1</b>	28837.4348 9	0.70401 3	28839.494 9	1.35601 8
<b>R5</b>	28840.595	2.45604 4	35	14.25	51.3	<b>2.53604</b> <b>5</b>	28839.3869 3	1.20802 2	28841.923	1.32802 3
<b>R6</b>	28842.819	2.22403 9	31.5	14.16	51.0	<b>3.40806</b>	28841.1389 6	1.68002 9	28844.547	1.72803 1
<b>R7</b>	28845.035	2.21604	31.5	14.21	51.2	<b>3.73606</b> <b>7</b>	28843.7870 1	1.24802 3	28847.523 1	2.48804 4
<b>R8</b>	28846.867 1	1.83203 3	31.5	17.19	61.9	<b>3.08804</b> <b>9</b>	28846.2670 5	0.60001 1	28849.355 1	2.48803 8
<b>R9</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R10</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R11</b>	28851.163 1	4.29607 6	70	16.29	58.7	<b>3.25605</b> <b>8</b>	28850.3951 3	0.76801 3	28853.651 2	2.48804 5
<b>R12</b>	28852.851 2	1.68803 1	35	20.73	74.6	<b>3.42406</b> <b>1</b>	28851.9151 5	0.93601 7	28855.339 2	2.48804 4

### 8.1.3.4 Prueba DIN4

Tabla 36 Determinación de velocidad – DIN4- Primer evento.

<i>DIN4_C3_alcance (primer evento)</i>										
Sensor	Tiempo (amplitud máxima)	Delta tiempo (s)	Distancia entre sensores (m)	Velocidad estimada (m/s)	Velocidad estimada (km/h)	Tiempo por efecto de la carga viva (s)	Tant (s)	Tiempo antes (s)	Tdesp(s)	Tiempo después (s)
<b>R1</b>	30845.7512	0	0	No aplica	No aplica	<b>4.144074</b>	30843.8232	1.928035	30847.9673	2.216039
<b>R2</b>	30850.8073	5.056092	35	6.92	24.9	<b>3.208058</b>	30849.2473	1.560028	30852.4554	1.64803
<b>R3</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R4</b>	30856.7354	5.928108	35	5.90	21.3	<b>3.368059</b>	30854.18339	2.552047	30857.5515	0.816012
<b>R5</b>	30860.4795	3.744067	35	9.35	33.7	<b>4.304078</b>	30858.07146	2.408043	30862.3755	1.896035
<b>R6</b>	30864.5756	4.096075	31.5	7.69	27.7	<b>3.78407</b>	30862.83155	1.744032	30866.6156	2.040038
<b>R7</b>	30869.2157	4.640084	31.5	6.79	24.4	<b>4.560083</b>	30871.63971	-2.424045	30876.1998	6.984128
<b>R8</b>	30873.7117	4.496083	31.5	7.01	25.2	<b>0</b>		30873.7117		- 30873.7117
<b>R9</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R10</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R11</b>	30884.2719	10.560192	70	6.63	23.9	<b>0</b>		30884.2719		- 30884.2719
<b>R12</b>	30888.648	4.376071	35	8.00	28.8	<b>4.424084</b>	30886.71198	1.93603	30891.1361	2.488054

Tabla 37 Determinación de velocidad – DIN4- Segundo evento.

<i>DIN4_C3_alcance (segundo evento)</i>										
Sensor	Tiempo (amplitud máxima)	Delta tiempo (s)	Distancia entre sensores (m)	Velocidad estimada (m/s)	Velocidad estimada (km/h)	Tiempo por efecto de la carga viva (s)	Tant (s)	Tiempo antes (s)	Tdesp(s)	Tiempo después (s)
<b>R1</b>	30867.0556	0	0	No aplica	No aplica	<b>3.456062</b>	30866.08761	0.968017	30869.5437	2.488045
<b>R2</b>	30869.9517	2.896053	35	12.09	43.5	<b>3.376061</b>	30869.06366	0.888016	30872.4397	2.488045
<b>R3</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R4</b>	30872.7357	2.784051	35	12.57	45.3	<b>3.760069</b>	30871.46371	1.272023	30875.2238	2.488046
<b>R5</b>	30874.3278	1.592029	35	21.98	79.1	<b>2.744051</b>	30874.07175	0.256005	30876.8158	2.488046
<b>R6</b>	30877.5598	3.232059	31.5	9.75	35.1	<b>2.280042</b>	30876.8798	0.680013	30879.1598	1.600029
<b>R7</b>	30882.135	4.575183	31.5	6.88	24.8	<b>3.152052</b>	30881.47189	0.663112	30884.6239	2.48894
<b>R8</b>		- 30882.135	31.5	0.00	0.0	<b>0</b>		0		0

<b>R9</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R10</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R11</b>	30886.47 2	30886.47 2	70	0.00	0.0	<b>0</b>		30886.4 72		- 30886.47 2
<b>R12</b>		- 30886.47 2	35	0.00	0.0	<b>0</b>		0		0

Tabla 38 Determinación de velocidad – DIN4- Tercer evento.

<b>DIN4_C3_alcance (tercer evento)</b>										
Sensor	Tiempo (amplitud máxima)	Delta tiempo (s)	Distancia entre sensores (m)	Velocidad estimada (m/s)	Velocidad estimada (km/h)	Tiempo por efecto de la carga viva (s)	Tant (s)	Tiempo antes (s)	Tdesp(s)	Tiempo después (s)
<b>R1</b>	30952.63 32	0	0	No aplica	No aplica	<b>4.40008</b>	30950.193 14	2.440042	30954.59 32	1.960038
<b>R2</b>	30957.04 13	4.408083	35	7.94	28.6	<b>2.88005 3</b>	30955.641 24	1.400026	30958.52 13	1.480027
<b>R3</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R4</b>	30962.04 94	5.008091	35	6.99	25.2	<b>2.98405 4</b>	30960.417 32	1.63203	30963.40 14	1.352024
<b>R5</b>	30875.23 18	- 86.81757 9	35	-0.40	-1.5	<b>2.85605 3</b>	30874.071 75	1.160022	30876.92 78	1.696031
<b>R6</b>		- 30875.23 2	31.5	0.00	0.0	<b>0</b>		0		0
<b>R7</b>		0	31.5	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	<b>0</b>		0		0
<b>R8</b>	30980.18 57	30980.18 6	31.5	0.00	0.0	<b>4.45608 6</b>	30978.217 65	1.968036	30982.67 37	2.48805
<b>R9</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R10</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R11</b>	30987.22 58	7.040129	70	9.94	35.8	<b>0</b>		30987.22 58		- 30987.225 8
<b>R12</b>	30994.54 59	7.320133	35	4.78	17.2	<b>4.23207 7</b>	30992.801 91	1.744032	30997.03 4	2.488045

Tabla 39 Determinación de velocidad – DIN4- Cuarto evento.

<b>DIN4_C3_alcance (cuarto evento)</b>										
Sensor	Tiempo (amplitud máxima)	Delta tiempo (s)	Distancia entre sensores (m)	Velocidad estimada (m/s)	Velocidad estimada (km/h)	Tiempo por efecto de la carga viva (s)	Tant (s)	Tiempo antes (s)	Tdesp(s)	Tiempo después (s)
<b>R1</b>	30959.929 3	0	0	No aplica	No aplica	<b>2.15203 9</b>	30958.825 3	1.10402	30960.977 3	1.04801 9
<b>R2</b>	30963.233 4	3.30406	35	10.59	38.1	<b>1.56802 8</b>	30962.705 37	0.52800 9	30964.273 4	1.04001 9
<b>R3</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R4</b>	30966.897 4	3.664067	35	9.55	34.4	<b>1.29600 6</b>	30966.889 44	0.00800 1	30968.185 4	1.28800 5

<b>R5</b>	30966.857 4	-0.040001	35	-874.98	-3149.9	<b>2.93599</b> 7	30965.425 4	1.43204 3	30968.361 4	1.50395 4
<b>R6</b>	30972.409 5	5.552101	31.5	5.67	20.4	<b>3.26406</b>	30970.889 51	1.52002 8	30974.153 6	1.74403 2
<b>R7</b>	30976.177 6	3.768069	31.5	8.36	30.1	<b>3.44809</b> 9	30974.857 57	1.32004 3	30978.305 7	2.12805 6
<b>R8</b>	- 30976.17 8		31.5	0.00	0.0	<b>0</b>		0		0
<b>R9</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R10</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	<b>Sin datos</b>	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
<b>R11</b>	30990.073 9	30990.07 4	70	0.00	0.0	<b>3.28805</b> 9	30988.577 84	1.49602 6	30991.865 9	1.79203 3
<b>R12</b>	- 30990.07 4		35	0.00	0.0	<b>0</b>		0		0

### 8.1.4 Modelo matemático

En seguida se realizó, por cada carril y para cada sensor, un modelo de regresión lineal ajustado.

A partir de los datos de deformación unitaria se obtuvieron las ecuaciones para calcular el peso bruto vehicular para el carril de baja velocidad y carril de alta velocidad.

En donde, “x” representa la deformación máxima a tensión generada por el paso del vehículo de autotransporte, en micro-deformaciones ( $\mu\epsilon$ ), mientras que “y”, indica el peso bruto vehicular en toneladas (t).

A continuación, se muestra en la tabla 24, se observa un resumen de los resultados del ajuste lineal por el método de mínimos cuadrados del coeficiente R2 para cada uno de los sensores instalados debajo de la viga principal del cuerpo A del puente Río Papaloapan, así como el modelo matemático que emana del mismo ajuste.

Tabla 40 Coeficiente R2 y ecuación para estimar el peso bruto vehicular (PBV) para cada sensor en carril de alta y baja velocidad.

Sensor	Carril			
	Baja velocidad		Alta velocidad	
	R2	Ecuación PBV	R2	Ecuación PBV
<b>R1</b>	0.9959	$y = 0.8265x - 3.151$	0.9826	$y = 0.9894x - 1.5045$
<b>R2</b>	0.9968	$y = 1.021x - 0.571$	0.9165	$y = 1.253x + 3.3327$
<b>R4</b>	0.9901	$y = 0.8963x + 0.2609$	0.9939	$y = 0.9971x + 4.9449$
<b>R5</b>	0.9973	$y = 1.3389x - 4.8791$	0.9771	$y = 1.394x - 0.1772$
<b>R6</b>	0.9787	$y = 1.3685x - 2.8226$	0.9513	$y = 1.4646x + 2.3443$
<b>R7</b>	0.9953	$y = 0.3563x + 7.9227$	0.9855	$y = 0.4258x + 9.8716$
<b>R8</b>	0.9958	$y = 2.8996x - 2.0506$	0.9112	$y = 3.2087x + 0.7201$
<b>R11</b>	0.9973	$y = 0.9791x - 1.3968$	0.9913	$y = 1.1342x + 1.12$
<b>R12</b>	0.9892	$y = 2.7864x - 1.1819$	0.9897	$y = 3.7258x - 5.8605$

## 8.2 Validación del algoritmo

### 8.2.1 Identificación de vehículos con sobrepeso

A través de las cámaras del sistema de monitoreo del puente Río Papaloapan, se identificó el paso de vehículos C3 en diferentes horarios.



Figura 47 Vehículo C3 circulando en el carril de baja del cuerpo A.

Posteriormente, se analizaron los registros de los sensores de deformación de cada evento aplicando el algoritmo desarrollado. De modo que, se obtuvo a través de la ecuación correspondiente para cada sensor y carril, el peso bruto vehicular de cada evento.

En la tabla 25, se muestran los resultados para el sensor R7, de los PBV correspondientes al paso de vehículos C3 a través del puente. Con ello se puede observar que, verificando de acuerdo a la NOM-12, el peso bruto máximo permitido para vehículos C3 en camino tipo A es de 27.5 t, por lo que podemos afirmar, de acuerdo a la pequeña muestra de datos analizados, que un 10% de los vehículos C3 analizados presentan sobrecarga.

Tabla 41 Resultados del PBV de vehículos C3, obtenidos a través de los registros de deformación del sensor R7.

<b>Carril</b>	<b>R7 (<math>\mu\epsilon</math>)</b>	<b>PBV (t)</b>	<b>Sobrecarga (t)</b>	<b>Sobrecarga (%)</b>
<b>Baja</b>	22.37	15.89	-11.6	-42%
<b>Baja</b>	53.51	26.99	-0.5	-2%
<b>Baja</b>	53.51	26.99	-0.5	-2%
<b>Baja</b>	12.23	12.28	-15.2	-55%
<b>Baja</b>	22.52	15.95	-11.6	-42%
<b>Baja</b>	35.13	20.44	-7.1	-26%
<b>Baja</b>	44.7	23.85	-3.7	-13%
<b>Baja</b>	<b>119.7</b>	<b>50.57</b>	<b>23.1</b>	<b>84%</b>
<b>Alta</b>	10.16	14.20	-13.3	-48%
<b>Baja</b>	19.34	14.81	-12.7	-46%

### **8.2.2 Identificación de configuración vehicular a partir del modelo matemático**

A partir de los registros de deformación de las pruebas dinámicas DIN1, DIN2, DIN3 y DIN4 para los vehículos de configuración vehicular C3 y del modelo obtenido del programa de elemento finito SAP2000 para las configuraciones vehiculares C3 y T3S2, se realizaron modelos de regresión lineal de los cuales, a partir de la amplitud

máxima de los registros de deformación se obtuvo una ecuación de tercer grado, la cual se utilizará para determinar a qué configuración vehicular pertenece el registro tomado del sistema de monitoreo permanente.

Tabla 42 Ecuaciones de regresión lineal para configuración C3 – Registro de pruebas dinámicas.

<b>Sensor</b>	<b>C3 Registro de Pruebas Dinámicas</b>
<b>R1</b>	$y = -2.5373x^4 + 5.9001x^3 - 4.0597x^2 - 0.3318x + 1.0153$
<b>R2</b>	$y = -1.9767x^4 + 5.2366x^3 - 4.3055x^2 + 0.0625x + 0.9908$
<b>R4</b>	$y = 0.0603x^4 + 1.3188x^3 - 2.5051x^2 + 0.1828x + 0.9817$
<b>R5</b>	$y = -1.4847x^4 + 3.8888x^3 - 3.1883x^2 - 0.2104x + 1.0002$
<b>R6</b>	$y = -1.8712x^4 + 4.8776x^3 - 4.3381x^2 + 0.3277x + 0.9924$
<b>R7</b>	$y = -0.4058x^4 + 1.6592x^3 - 1.746x^2 - 0.4104x + 1.0087$
<b>R8</b>	$= 1.3443x^4 - 2.9516x^3 + 2.773x^2 - 2.1829x + 1.0572$

Tabla 43 Ecuaciones de regresión lineal para configuración C3 – Modelo SAP2000.

<b>Sensor</b>	<b>C3 Modelo SAP2000</b>
<b>R1</b>	$y = 1.58x^3 - 1.8187x^2 - 0.7531x + 1.0382$
<b>R2</b>	$y = 1.1576x^3 - 2.3074x^2 + 0.167x + 0.9899$
<b>R4</b>	$y = 0.8884x^3 - 1.9352x^2 + 0.0736x + 0.9912$
<b>R5</b>	$= 1.6516x^3 - 2.729x^2 + 0.1164x + 1.0032$
<b>R6</b>	$y = 1.5778x^3 - 2.2572x^2 - 0.3134x + 1.0202$
<b>R7</b>	$y = 1.1025x^3 - 0.8267x^2 - 1.3014x + 1.0614$
<b>R8</b>	$y = 1.7686x^3 - 2.4088x^2 - 0.3409x + 1.0209$

Tabla 44 Ecuaciones de regresión lineal para configuración T3S2 – Modelo SAP2000.

Sensor	T3S2 Modelo SAP2000
<b>R1</b>	$y = 2.4683x^3 - 4.0416x^2 + 0.7128x + 0.951$
<b>R2</b>	$y = 5.9954x^3 - 7.7996x^2 + 0.6834x + 0.9576$
<b>R4</b>	$y = 1.6495x^3 - 3.6224x^2 + 0.7098x + 0.9329$
<b>R5</b>	$y = 0.7224x^3 - 2.0383x^2 + 0.3621x + 0.966$
<b>R6</b>	$y = 1.4835x^3 - 1.7056x^2 - 0.8632x + 1.0223$
<b>R7</b>	$y = 2.6503x^3 - 3.3182x^2 - 0.3191x + 1.0341$
<b>R8</b>	$y = 2.7246x^3 - 4.4959x^2 + 0.8383x + 0.9518$

De lo anterior, se tomaron del registro de monitoreo permanente, el registro del paso por el puente de 15 vehículos de configuración vehicular C3 y 15 vehículos T3S2.

Se implementó el algoritmo descrito anteriormente y se realizó el método de mínimos cuadrados del coeficiente R2 para cada uno de los sensores del cuerpo A del puente Río Papaloapan.

A continuación, en la siguiente tabla se presentan los resultados de los registros de los vehículos C3 del sistema de monitoreo, con las ecuaciones del modelo C3 de las pruebas dinámicas.

Tabla 45 Coeficiente de determinación R2 para vehículos C3 vs Modelo C3 Pruebas dinámicas.

Vehículos C3 con ecuación polinómica de vehículo C3 Pruebas dinámicas																
Sensor/ Vehículo	C3-1	C3-2	C3-3	C3-4	C3-5	C3-6	C3-7	C3-8	C3-9	C3-10	C3-11	C3-12	C3-13	C3-14	C3-15	Promedio
<b>R1</b>	0.969	0.893	0.993	0.997	0.963	0.972	0.991	0.944	0.997	0.987	0.991	0.991	0.978	0.982	0.994	0.976
<b>R2</b>	0.963	0.962	0.870	0.985	0.966	0.959	0.938	0.993	0.993	0.993	0.993	0.993	0.993	0.993	0.969	0.971
<b>R4</b>	0.980	0.989	0.988	0.989	0.994	0.965	1.000	0.999	0.999	1.000	0.997	0.915	0.989	0.933	0.984	0.981
<b>R5</b>	0.992	0.952	0.917	0.973	0.955	0.997	0.962	0.985	0.991	0.999	0.904	0.996	0.978	0.980	0.999	0.972
<b>R6</b>	0.908	0.826	0.996	0.997	0.985	0.992	0.858	0.927	0.996	0.980	0.981	0.997	0.967	0.985	0.980	0.958
<b>R7</b>	0.989	0.962	0.991	0.990	0.914	0.999	0.914	0.949	0.941	0.997	0.996	0.997	0.997	0.997	0.941	0.971
<b>R8</b>	0.957	0.846	0.799	0.920	0.825	0.933	0.970	0.856	0.983	0.968	0.924	0.800	0.968	0.965	0.968	0.912

Tabla 46 Coeficiente de determinación R2 para vehículos C3 vs Modelo SAP 2000 C3 Pruebas dinámicas.

Vehículos C3 con ecuación polinómica de modelo SAP 2000 C3 Pruebas dinámicas																
Sensor/ Vehículo	C3-1	C3-2	C3-3	C3-4	C3-5	C3-6	C3-7	C3-8	C3-9	C3-10	C3-11	C3-12	C3-13	C3-14	C3-15	Promedio
R1	0.956	0.879	0.990	0.992	0.953	0.954	0.990	0.937	0.996	0.987	0.923	0.978	0.971	0.986	0.990	0.966
R2	0.996	0.992	0.958	0.997	0.996	0.993	0.990	0.977	0.976	0.977	0.977	0.977	0.977	0.976	1.000	0.984
R4	0.976	0.997	0.991	0.993	0.990	0.983	0.998	0.999	0.994	0.996	0.999	0.897	0.981	0.955	0.994	0.983
R5	0.990	0.981	0.949	0.992	0.978	0.998	0.986	0.998	0.999	0.821	0.944	0.997	0.989	0.951	0.821	0.960
R6	0.920	0.771	0.995	0.998	0.965	0.973	0.814	0.958	0.985	0.888	0.961	0.986	0.941	0.970	0.888	0.934
R7	0.926	0.981	0.981	0.993	0.972	0.974	0.803	0.846	0.992	0.961	0.960	0.961	0.961	0.961	0.992	0.951
R8	0.996	0.925	0.878	0.979	0.875	0.984	0.987	0.919	0.995	0.844	0.973	0.857	0.997	0.996	0.844	0.937

Tabla 47 Coeficiente de determinación R2 para vehículos C3 vs Modelo SAP 2000 T3S2.

Vehículos C3 con ecuación polinómica de modelo SAP 2000 T3S2																
Sensor/ Vehículo	C3-1	C3-2	C3-3	C3-4	C3-5	C3-6	C3-7	C3-8	C3-9	C3-10	C3-11	C3-12	C3-13	C3-14	C3-15	Promedio
R1	0.987	0.961	0.982	0.976	0.993	0.968	0.982	0.994	0.973	0.987	0.978	0.960	0.983	0.986	0.980	0.979
R2	0.867	0.886	0.721	0.898	0.863	0.847	0.806	0.915	0.915	0.917	0.916	0.916	0.918	0.911	0.879	0.878
R4	0.977	0.997	0.991	0.993	0.991	0.983	0.998	0.999	0.994	0.880	0.998	0.899	0.982	0.954	0.994	0.975
R5	0.956	0.997	0.995	0.990	0.996	0.951	0.995	0.977	0.969	0.819	0.996	0.956	0.985	0.859	0.819	0.951
R6	0.931	0.703	0.976	0.989	0.928	0.941	0.750	0.979	0.958	0.934	0.923	0.968	0.896	0.935	0.934	0.916
R7	0.941	0.960	0.985	0.964	0.980	0.814	0.876	0.973	0.963	0.961	0.963	0.962	0.962	0.973	0.983	0.951
R8	0.984	0.977	0.943	0.996	0.920	0.992	0.970	0.963	0.958	0.965	0.987	0.911	0.970	0.983	0.965	0.966

La información anterior se resume en los siguientes gráficos:

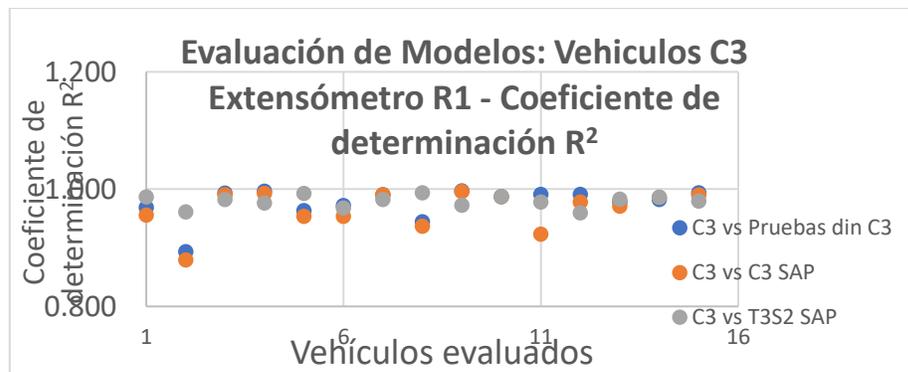


Figura 48 Evaluación de modelos: Vehículos C3 - Extensómetro R1.

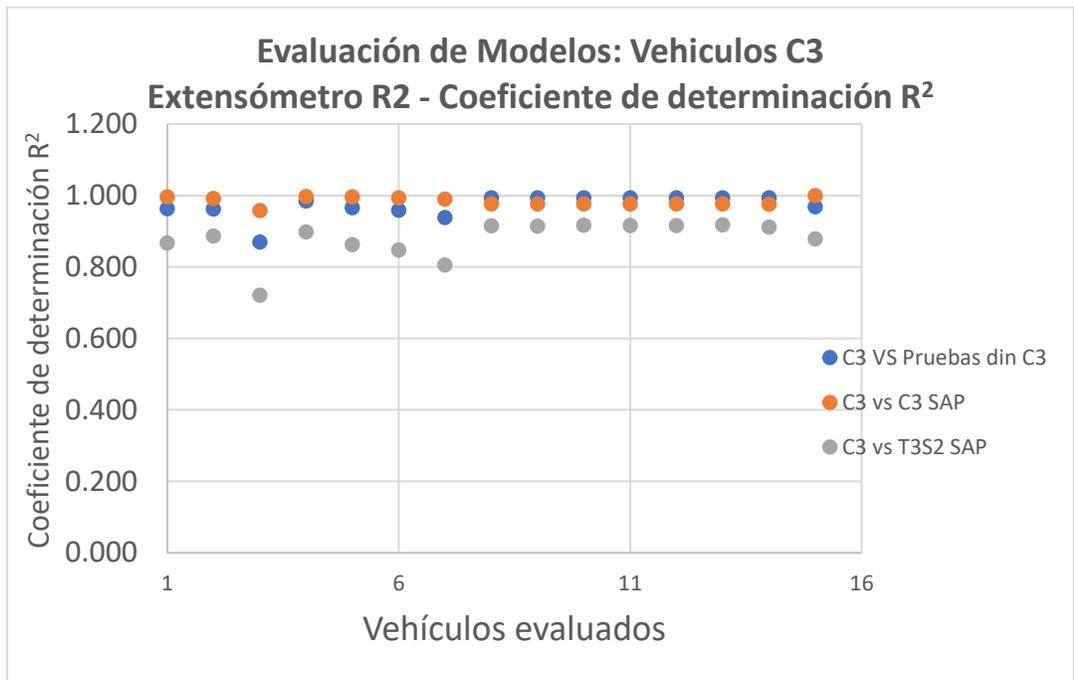


Figura 49 Evaluación de modelos: Vehículos C3 - Extensómetro R2.

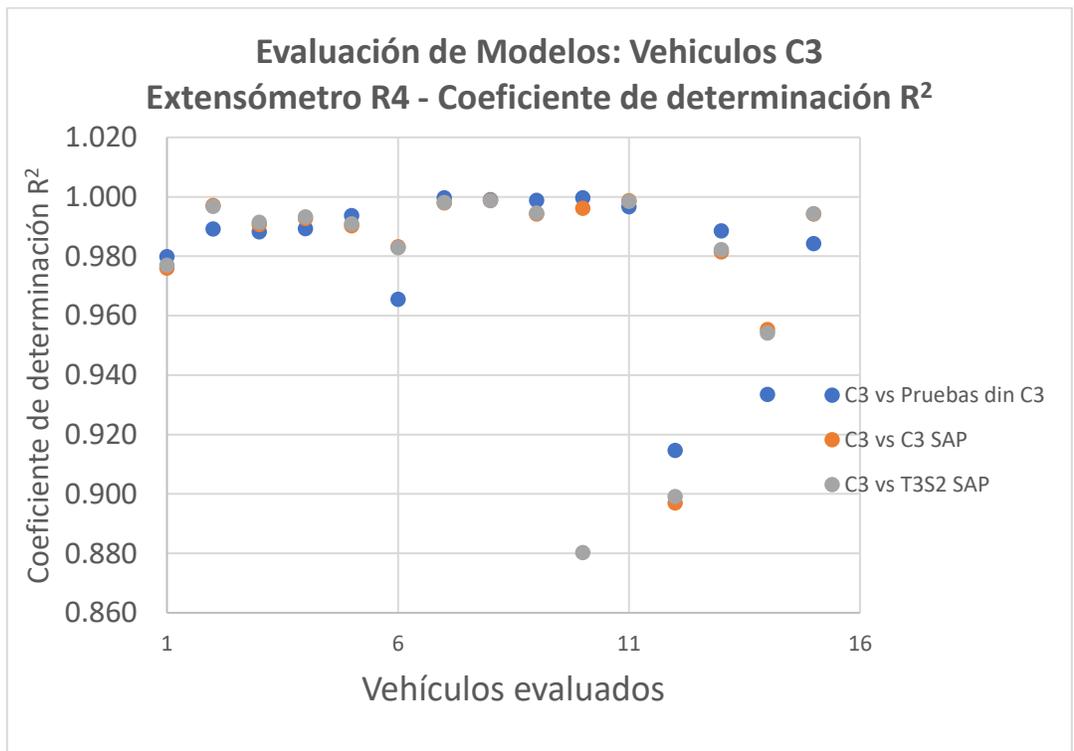


Figura 50 Evaluación de modelos: Vehículos C3 - Extensómetro R4.

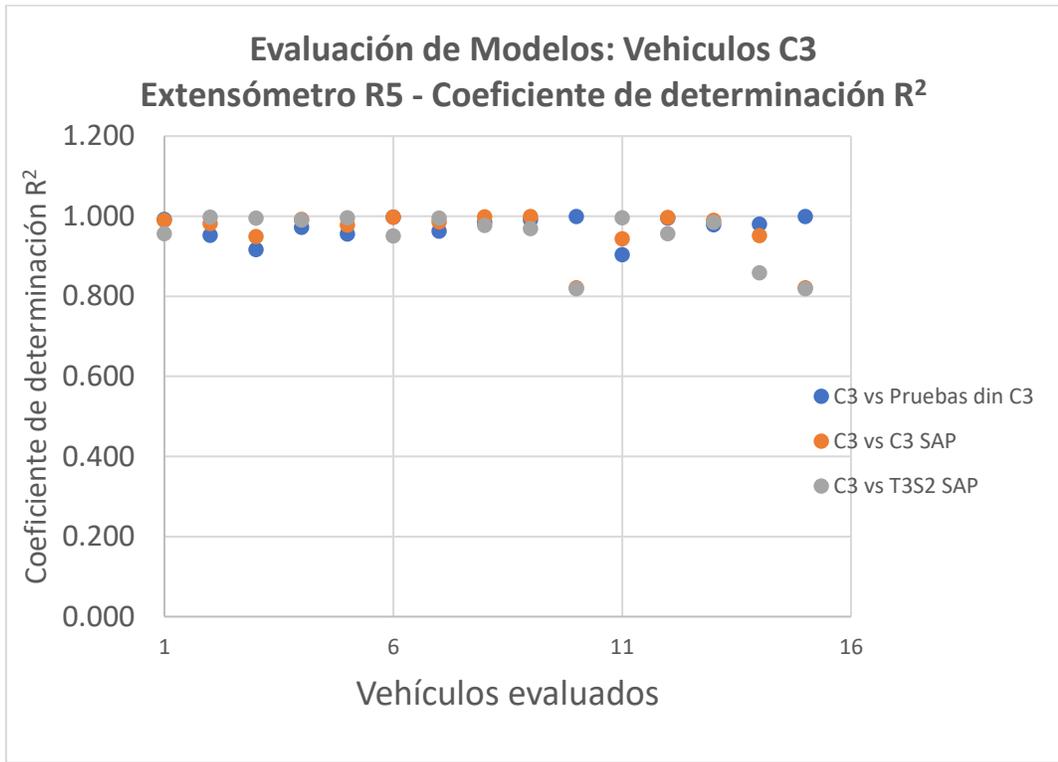


Figura 51 Evaluación de modelos: Vehículos C3 - Extensómetro R5.

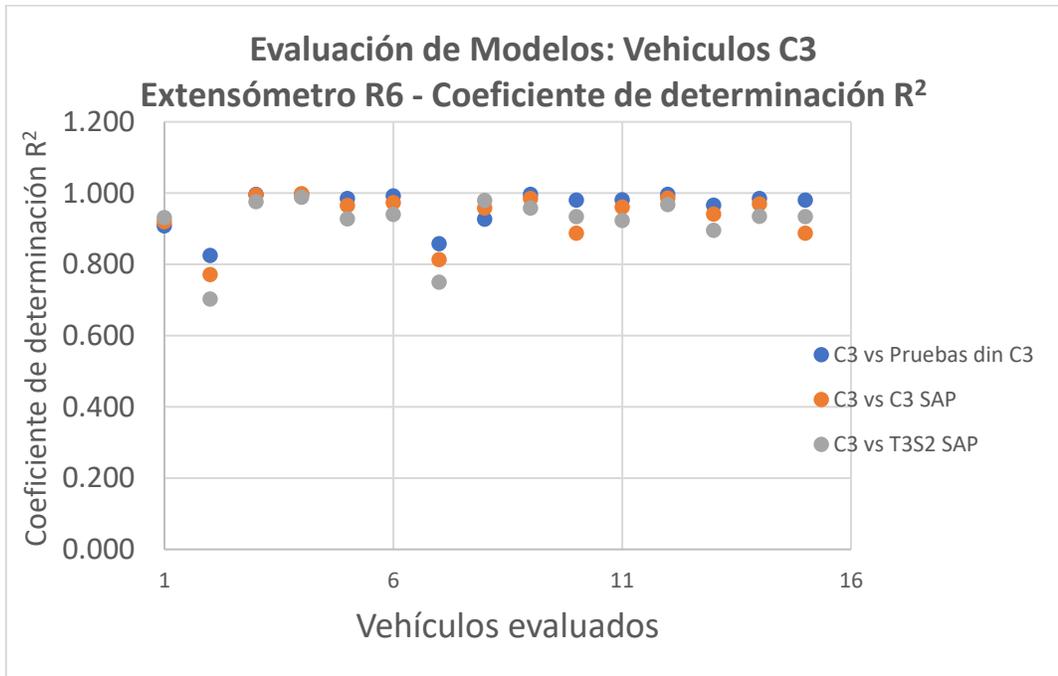


Figura 52 Evaluación de modelos: Vehículos C3 - Extensómetro R6.

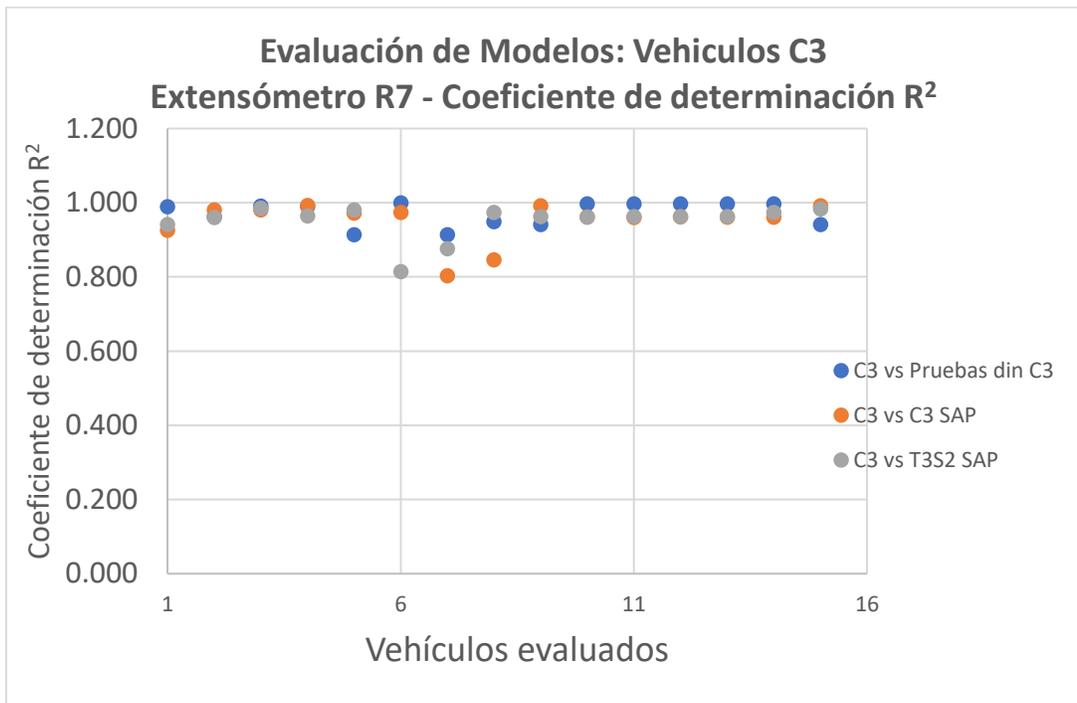


Figura 53 Evaluación de modelos: Vehículos C3 - Extensómetro R7.

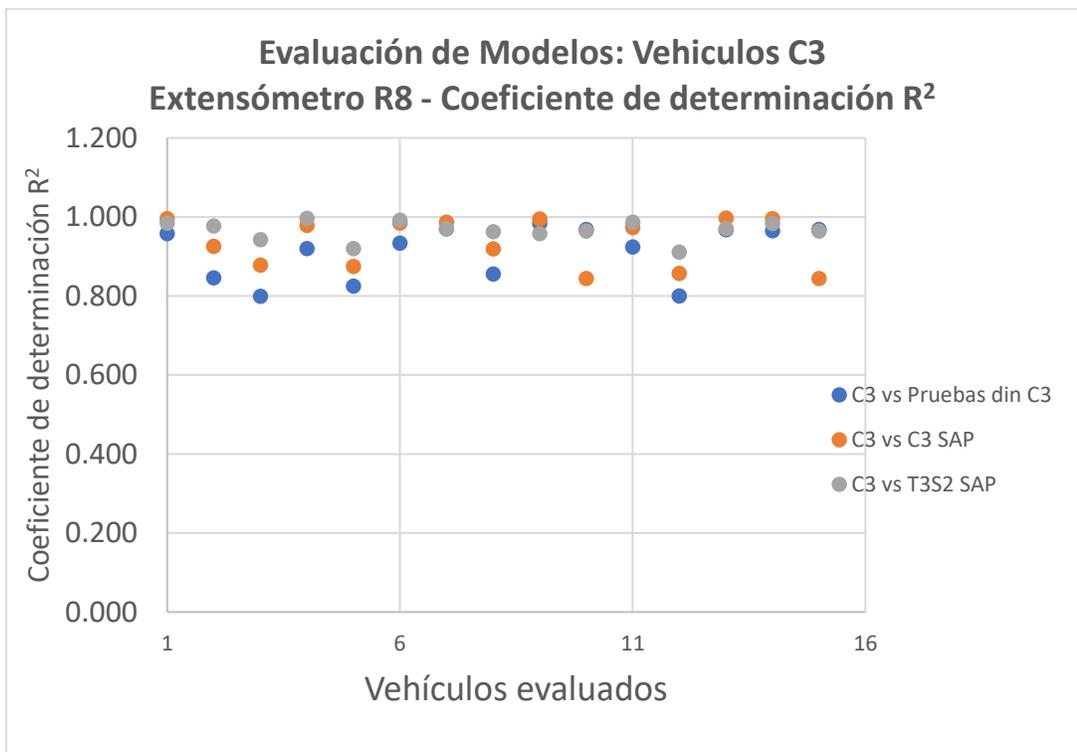


Figura 54 Evaluación de modelos: Vehículos C3 - Extensómetro R8.

A continuación, en la siguiente tabla se presentan los resultados de los registros de los vehículos T3S2 del sistema de monitoreo, con las ecuaciones del modelo C3 de las pruebas dinámicas y T3S2.

Tabla 48 Coeficiente de determinación R2 para vehículos T3S2 vs Modelo C3 Pruebas dinámicas.

Vehículos T3S2 con ecuación polinómica de vehículo C3 Pruebas dinámicas																
Sensor/Vehículo	T3S 2-1	T3S 2-2	T3S 2-3	T3S 2-4	T3S 2-5	T3S 2-6	T3S 2-7	T3S 2-8	T3S 2-9	T3S2-10	T3S2-11	T3S2-12	T3S2-13	T3S2-14	T3S2-15	Promedio
<b>R1</b>	0.988	0.969	0.988	0.964	0.962	0.424	0.993	0.997	0.969	0.925	0.575	0.948	0.995	0.961		0.904
<b>R2</b>	0.967	0.963	0.820	0.930	0.777	0.947	0.870	0.993	0.993	0.993	0.993	0.993	0.993	0.993	0.967	0.946
<b>R4</b>	0.993	0.998	0.959	0.993	0.933	0.983	0.988	0.994	0.999	0.973	0.998	0.967	0.997	0.985	0.988	0.983
<b>R5</b>	0.925	0.979	0.916	0.953	0.848	0.960	0.917	0.947	0.947	0.991	0.996	0.968	0.981	0.937	0.991	0.950
<b>R6</b>	0.986	0.996	0.966	0.942	0.972	0.997	0.934	0.995	0.999	0.993	0.993	0.980	0.999	0.969	0.993	0.981
<b>R7</b>	0.992	0.983	0.994	0.994	0.979	0.999	0.998	0.958	0.969	0.997	0.997	0.996	0.725	0.969	0.858	0.961
<b>R8</b>	0.863	0.910	0.933	0.921	0.809	0.897	0.935	0.927	0.923	0.873	0.924	0.723	0.926	0.918	0.873	0.890

Tabla 49 Coeficiente de determinación R2 para vehículos T3S2 vs Modelo SAP 2000 C3 Pruebas dinámicas.

Vehículos T3S2 con ecuación polinómica de modelo SAP 2000 C3 Pruebas dinámicas																
Sensor/V	T3S 2-1	T3S 2-2	T3S 2-3	T3S 2-4	T3S 2-5	T3S 2-6	T3S 2-7	T3S 2-8	T3S 2-9	T3S2-10	T3S2-11	T3S2-12	T3S2-13	T3S2-14	T3S2-15	Promedio
<b>R1</b>	0.983	0.976	0.957	0.964	0.379	0.990	0.990	0.960	0.909	0.515	0.943	0.997	0.956		0.978	0.893
<b>R2</b>	1.000	0.996	0.922	0.989	0.886	0.996	0.958	0.976	0.976	0.976	0.976	0.976	0.976	0.977	1.000	0.972
<b>R4</b>	0.998	1.000	0.978	0.995	0.956	0.994	0.991	0.999	0.999	0.988	0.992	0.984	0.999	0.995	0.978	0.990
<b>R5</b>	0.959	0.996	0.949	0.977	0.891	0.984	0.949	0.975	0.975	0.999	0.982	0.989	0.996	0.967	0.999	0.973
<b>R6</b>	0.968	0.989	0.940	0.905	0.952	0.986	0.926	0.997	0.999	0.975	0.997	0.966	0.991	0.940	0.975	0.967
<b>R7</b>	0.977	0.730	0.961	0.977	0.977	0.921	0.965	0.977	0.999	0.993	0.961	0.961	0.961	0.816	0.993	0.944
<b>R8</b>	0.938	0.962	0.985	0.970	0.886	0.956	0.981	0.984	0.988	0.951	0.973	0.895	0.998	0.974	0.951	0.959

Tabla 50 Coeficiente de determinación R2 para vehículos T3S2 vs Modelo SAP 2000 T3S2.

Vehículos T3S2 con ecuación polinómica de modelo SAP 2000 T3S2																
Sensor/V	T3S 2-1	T3S 2-2	T3S 2-3	T3S 2-4	T3S 2-5	T3S 2-6	T3S 2-7	T3S 2-8	T3S 2-9	T3S2-10	T3S2-11	T3S2-12	T3S2-13	T3S2-14	T3S2-15	Promedio
R1	0.990	0.884	0.994	0.997	0.421	0.982	0.944	0.988	0.975	0.997	0.962	0.997	0.991	0.987	0.621	0.915
R2	0.869	0.867	0.652	0.804	0.600	0.834	0.721	0.912	0.912	0.913	0.914	0.915	0.914	0.916	0.866	0.841
R4	0.998	1.000	0.978	0.996	0.956	0.994	0.991	0.999	0.999	0.962	0.992	0.984	1.000	0.995	0.979	0.988
R5	0.999	0.970	0.995	0.997	0.994	0.996	0.995	0.999	0.999	0.861	0.906	0.992	0.983	0.998	0.861	0.968
R6	0.931	0.966	0.894	0.852	0.911	0.960	0.925	0.982	0.980	0.943	0.987	0.929	0.968	0.896	0.943	0.938
R7	0.993	0.985	0.962	0.990	0.953	0.979	0.985	0.988	0.990	0.963	0.962	0.962	0.746	0.990		0.960
R8	0.983	0.983	0.994	0.946	0.984	0.990	0.979	0.998	0.999	0.987	0.973	0.989	0.993	0.992		0.984

La información anterior se resume en los siguientes gráficos:

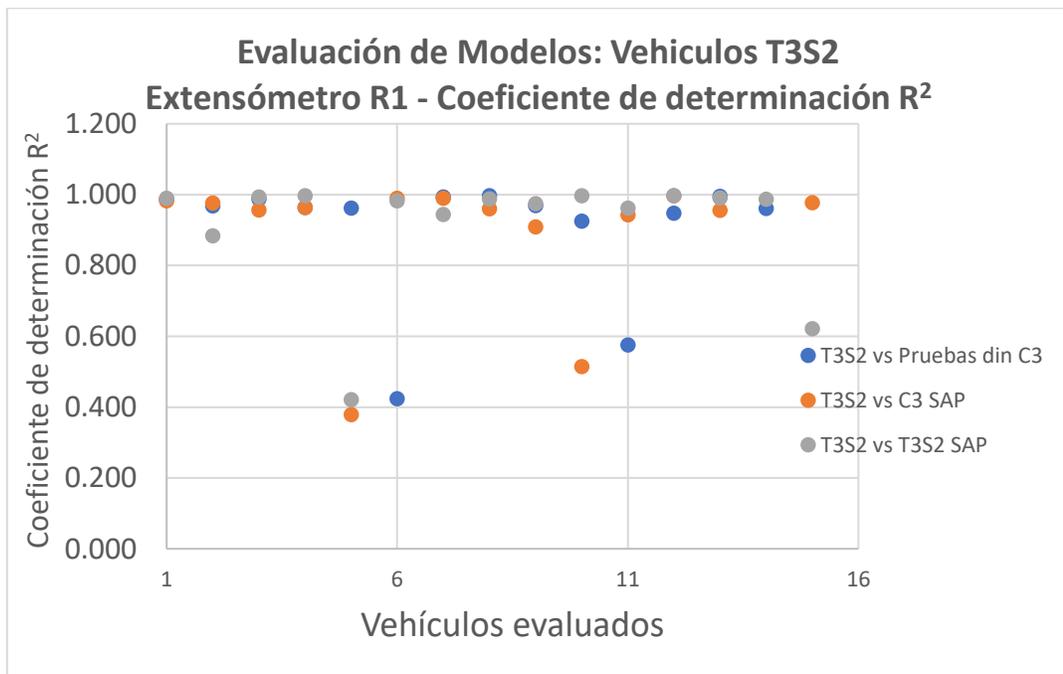


Figura 55 Evaluación de modelos: Vehículos T3S2 - Extensómetro R1.

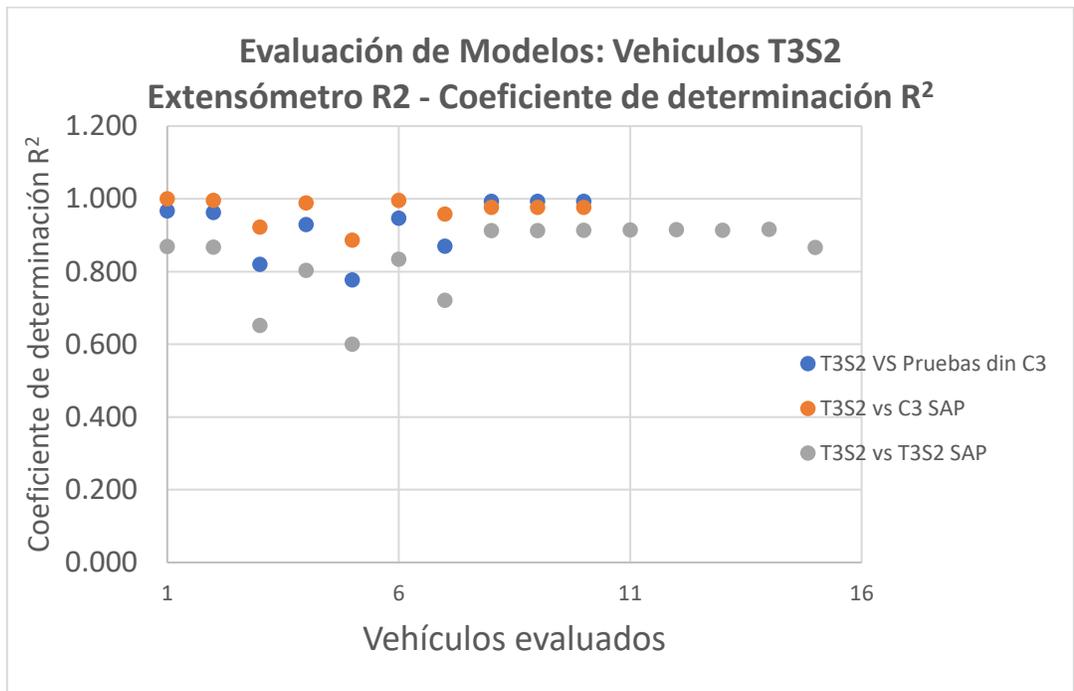


Figura 56 Evaluación de modelos: Vehículos T3S2 - Extensómetro R2.

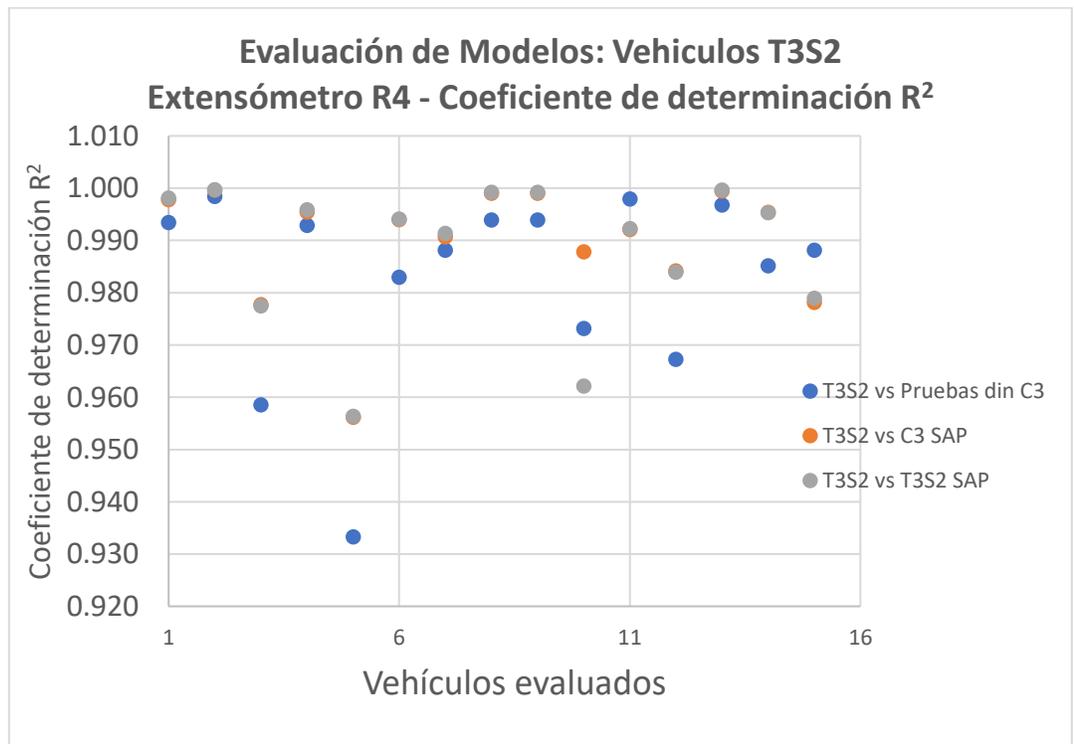


Figura 57 Evaluación de modelos: Vehículos T3S2 - Extensómetro R4.

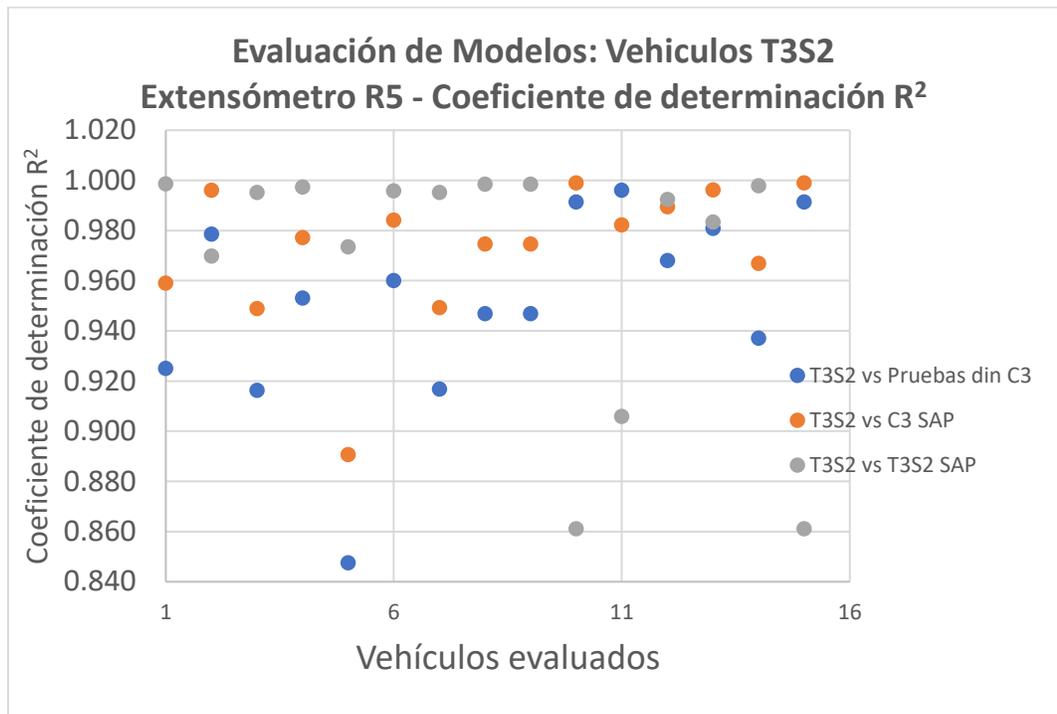


Figura 58 Evaluación de modelos: Vehículos T3S2 - Extensómetro R5.

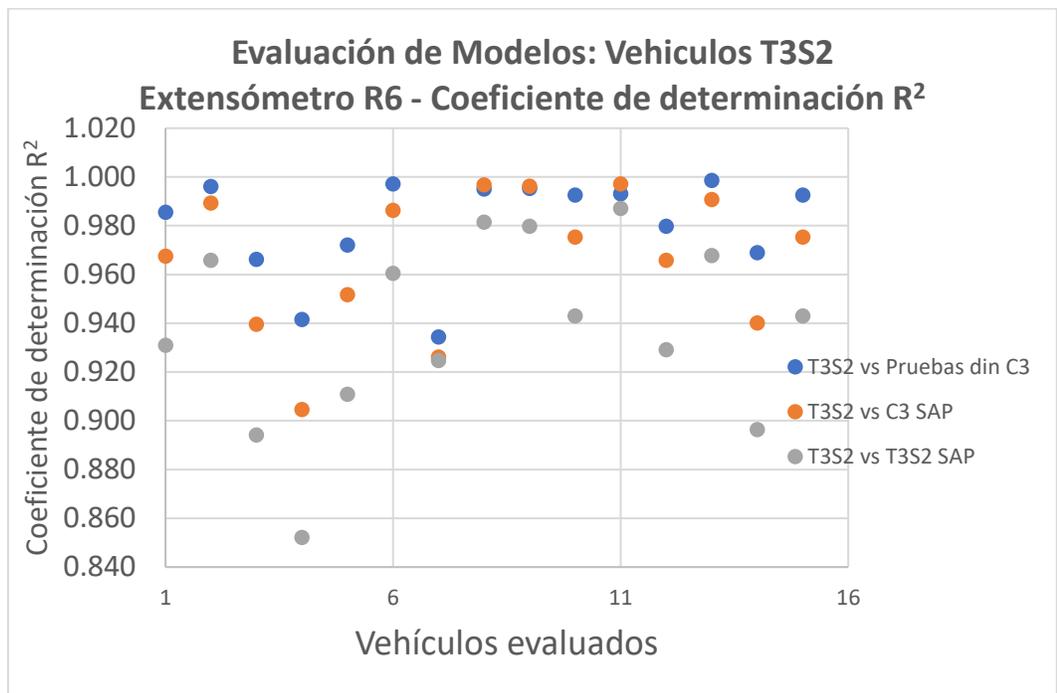


Figura 59 Evaluación de modelos: Vehículos T3S2 - Extensómetro R6.

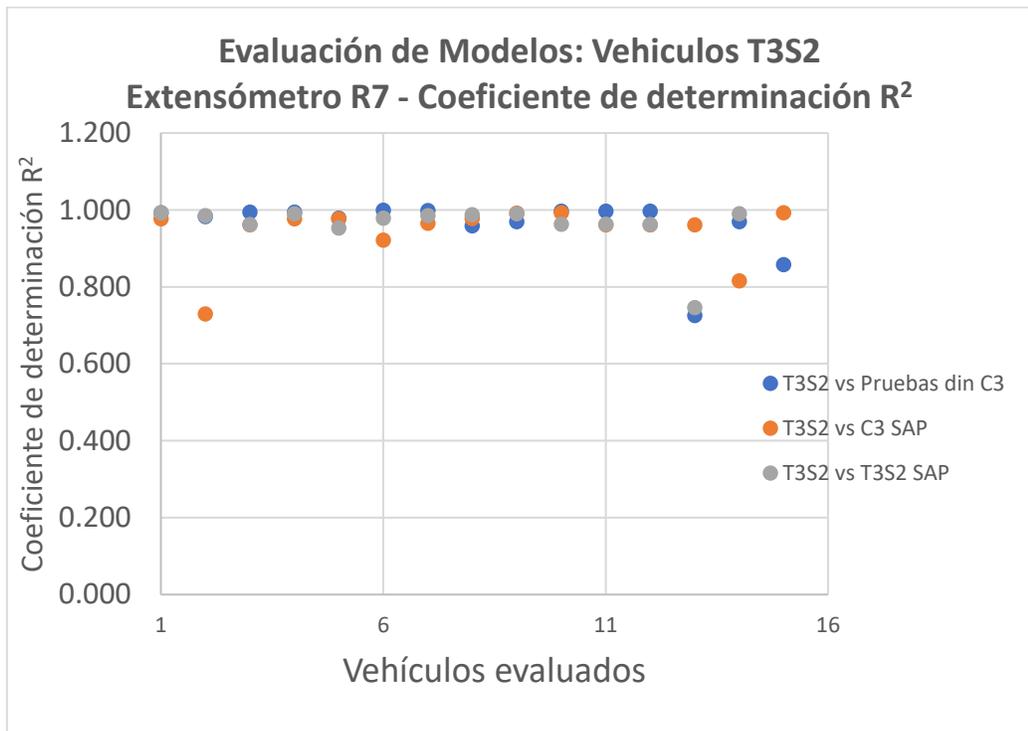


Figura 60 Evaluación de modelos: Vehículos T3S2 - Extensómetro R7.

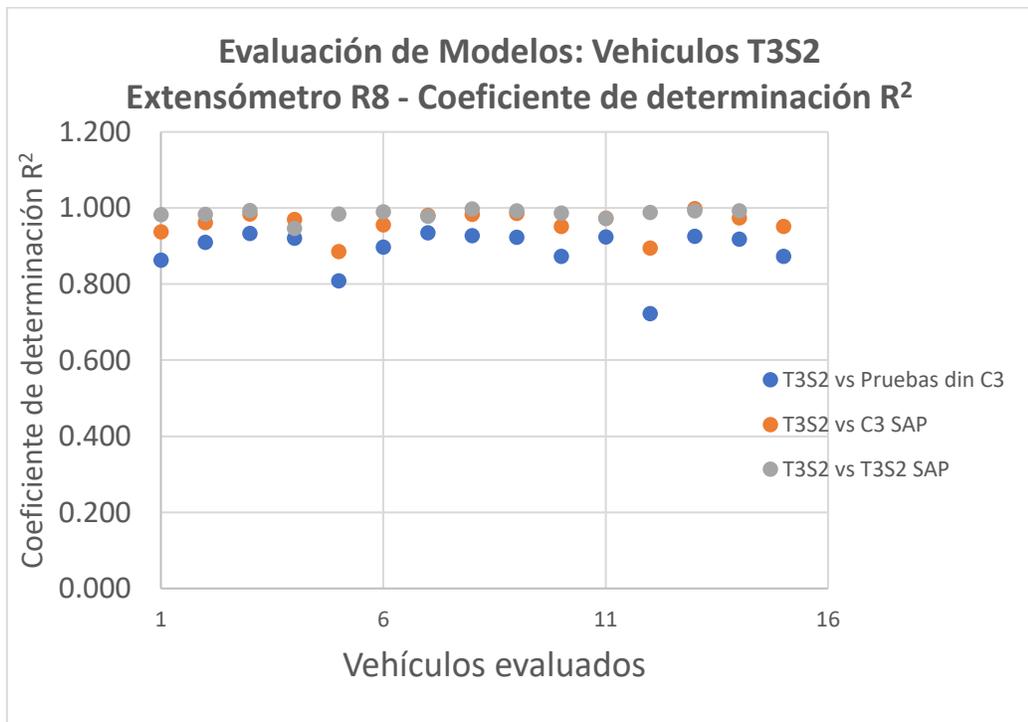


Figura 61 Evaluación de modelos: Vehículos T3S2 - Extensómetro R8.

## 9. Conclusiones

1. 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, utilizando vehículos con configuración C3 circulando en un único cuerpo a diferentes carriles y velocidades.
2. Existe una alta correlación entre las deformaciones unitarias máximas a tensión generada por vehículos de autotransporte y el peso bruto vehicular. Inclusive, es suficiente un modelo lineal para describir tal relación, siendo superior al 97% para los vehículos que circulan en el carril de baja velocidad y 91% para los que circulan en el de alta velocidad.
3. 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.
4. Es posible identificar sobre el cuerpo A del puente el carril por donde circula el vehículo de autotransporte a través del cociente de deformación obtenido a partir de los datos de los extensómetros ubicados en el cuerpo A y B.
5. A partir de ubicación de los extensómetros y el tiempo donde se presenta la amplitud máxima por el paso de un vehículo en cada sensor es posible determinar la velocidad a la circulan los vehículos de autotransporte.
6. Se compararon las deformaciones obtenidas a partir del modelo de elemento finito con las presentadas en las pruebas experimentales para así mostrar un modelo ideal a partir de la media de estas deformaciones que se ajusta a los datos reales para vehículos C3 y T3S2.
7. A partir de la evaluación de los registros de vehículos T3S2 en el modelo matemático de los vehículos C3, es posible identificar estos vehículos para el extensómetro R8.

8. De la evaluación de los vehículos C3 en el modelo matemático de los vehículos T3S2 a partir del modelo de elemento finito, es posible identificar estos vehículos para los extensómetros R2 y R7.
9. Se debe mejorar el modelo matemático a partir del modelo de elemento finito y los datos de deformación normalizados de los registros de vehículos C3 ya que no es posible discriminar aún entre las configuraciones C3 y T3S2.
10. Se ha desarrollado un algoritmo que permite conocer información relevante de los vehículos que circulan por los puentes monitoreados por el IMT con el objetivo de proporcionar a las autoridades información relevante para tener un mejor control vial del autotransporte que presenta sobrecarga en México.

## 10. Bibliografía o 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,» Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes, Sanfandila, 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 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.
- [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,» Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes, Sanfandila, 1992.
- [4] M. V. Biezma y F. Schanack, «Collapse of steel bridges,» *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 21, nº 5, pp. 144-150, Octubre 2007.
- [5] 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,» Secretaría

de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes, Sanfandila, Querétaro, 2015.

- [6] 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,» Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes, Sanfandila, 2021.
- [7] SWI, «Los derrumbes de puentes más mortíferos de los últimos 20 años,» [En línea]. Available: <https://www.swissinfo.ch/spa/los-derrumbes-de-puentes-m%C3%A1s-mort%C3%ADferos-de-los-%C3%BAltimos-20-a%C3%B1os/44322908>.
- [8] Mundo, BBC News, «Línea 12 de metro: las primeras conclusiones sobre las causas del accidente en Ciudad de México que provocó 26 muertos,» BBC , 2021. [En línea]. Available: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-57506096>.
- [9] Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes, *NORMA Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017, Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal.*, Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación, 2017, pp. 14-15.
- [10] 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 autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal,» 2018.
- [11] G. Triada, «Puente Río Papaloapan,» [En línea]. Available: <https://www.triada.com.mx/puente-r%C3%ADo-papaloapan.html>. [Último acceso: 2021].

- [12] M. Machorro López, J. A. Quintana Rodríguez, J. A. Hernández Figueroa y H. M. Gasca Zamora, «Identificación de daño en puentes vehiculares mediante el método de acumulación de energía wavelet,» Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, 2021.
- [13] L. á. Martínez Trujano, J. A. Quintana Rodríguez, F. J. Carrión Viramontes, M. Anaya Díaz , J. A. Hernández Figueroa, H. M. Gasca Zamora, G. M. Guzmán Acevedo y J. M. Machorro López , «Medición de la velocidad y el peso bruto de vehículos de carga a partir del monitoreo de puentes,» *Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica*, vol. XXII, pp. 2-3, 6, 11, 17 Febrero 2021.
- [14] F. J. Carrión Viramontes, J. R. Hernández Jiménez y J. Terán Guillén, «Estudio experimental de un puente atirantado,» Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, 2005.
- [15] J. L. M. García, *Efectos de fatiga y extremos en puentes de concreto presforzado ante cargas de vehículos pesados*, R. d. I. U. A. d. Querétaro, Ed., Querétaro: Universidad Autónoma de Querétaro, 2014, pp. 12-14.
- [16] J. Bermejo Leal y Pardillo Mayora, «Aplicación del pesaje de vehículos en movimiento al dimensionamiento de firmes. Influencia de la precisión de los pesajes,» *Informes de la Construcción*, vol. 69 (545), nº 1-10, p. 10, 31 Marzo 2017.
- [17] Y. Yu, C. CS y D. Lu, «State-of-the-art review on bridge weigh-in-motion technology,» 2016.
- [18] M. d. J. F. Gallegos, *Pesaje Dinámico en Carreteras*, CENAM, Ed., Querétaro: Centro Nacional de Metrología (CENAM), 2018, p. 21.

- [19] X. Ye, J. Xudong, Y. Bin y S. Dan, «Infrastructure Safety Oriented Traffic Load Monitoring Using Multi-Sensor and Single Camera for Short and Medium Span Bridges,» 2019.
- [20] S. B. Kanwardeep, J. D. Baldwin y D. M. Kyran, «Method for Vehicle Identification and Classification for Bridge Response Monitoring,» *Society for Experimental Mechanics Inc*, vol. XXVIII, p. 11, February 2010.
- [21] M. M. Werneck, R. Allil C. S. B., B. A. Ribeiro y F. V. B. de Nazaré, «A Guide to fiber Bragg Grating Sensors,» 2013.
- [22] C. Doyle, «Fibre Bragg Grating Sensors An Introduction to Bragg gratings and interrogation techniques,» *Smart Fibres Ltd*, pp. 1-6, 01 01 2003.
- [23] T. Bashir Ahmad , A. Jalil y R. Rosly Abdul , «Strain Measurement with Fiber Bragg Grating Sensors,» *American Journal of Applied Science*, vol. 5, nº special issue, pp. 40-48, 2005.
- [24] D. Sizairi y A. Jalil, *Fibre Bragg Grating and No-Core Fibre Sensors*, Springer, 2018, pp. 1-3, 5-6.
- [25] J. C. Monrroy Rincón y M. Arrubla Tovar, «Estimación de cargas dinámicas de camiones pesados que circulan por un puente instrumentado con acelerómetros.,» Bogotá, 2013
- [26] Q. D. Sergio, «Aprende Python,» 2022. [En línea]. Available: [https://aprendepython.es/\\_downloads/907b5202c1466977a8d6bd3a2641453f/aprendepython.pdf](https://aprendepython.es/_downloads/907b5202c1466977a8d6bd3a2641453f/aprendepython.pdf).
- [27] 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*,

Sanfandila, Querétaro: Secretaría de Infraestructura Comunicaciones y Transportes, 2016.

[28] K. Group, Weight in Motion.

[29] C. C. N. d. N. d. I. S. d. E. (CCONNSE), *PROYECTO de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-198-SCFI-2017, Instrumentos de medición-Sistemas de pesaje y dimensionamiento dinámico vehicular-Requisitos técnicos y especificaciones.*, Ciudad de México, 2017.

[30] G. R. Gutiérrez, «Monitorización de estructuras de hormigón mediante sensores de fibra óptica distribuida.» Barcelona, 2017.

## Anexos

### Algoritmo para el filtrado de señal de las deformaciones de los registros de las pruebas dinámicas

```
# 1_D1_1_30kmh
import pandas as pd
import plotly.express as px
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from scipy.signal import butter, lfilter
import statistics

def butter_bandpass_filter(data, lowcut, highcut, fs, order=2):
    nyq = 0.5 * fs
    low = lowcut / nyq
    high = highcut / nyq

    b, a = butter(order, [low, high], btype='bandpass', analog=False)
    y = lfilter(b, a, data, axis=0)
    return y

nombre_archivo= "1_D1_1_30kmh.xlsx"
#workbook1 = nombre_archivo+ ".xlsx"
df = pd.read_excel(nombre_archivo)
#df

valores = df[["Time (sec)",
              "STRAIN_R1",
              "STRAIN_R2",
              "STRAIN_R3",
              "STRAIN_R4",
              "STRAIN_R5",
              "STRAIN_R6",
              "STRAIN_R7",
              "STRAIN_R8",
              "STRAIN_R9",
              "STRAIN_R10",
              "STRAIN_R11",
              "STRAIN_R12"
              ]]
```

```

for i in range (1,13):
    print(df.columns[i])
    media=df[df.columns[i]].mean()
    #df['Offset']= promediovalues
    resta= (df[df.columns[i]].values)- (media)
    df['sinmedia'+df.columns[i]]= resta
    filtro=butter_bandpass_filter(resta, 0.01, 1.5, 125, order=2)
    df['filtrado'+df.columns[i]]= filtro
    plt.plot(df[df.columns[0]].values, resta,df[df.columns[0]].values,
filtro)
    #plt.figure(figsize = (20, 20))
    plt.show()
    #input("Please press the Enter key to proceed")

df1= df.melt(id_vars= "Time (sec)", value_vars=
["sinmediaSTRAIN_R1","sinmediaSTRAIN_R2","sinmediaSTRAIN_R4","sinmedia
STRAIN_R5","sinmediaSTRAIN_R6","sinmediaSTRAIN_R7","sinmediaSTRAIN_R8"
,"sinmediaSTRAIN_R11","sinmediaSTRAIN_R12"])
df2= df.melt(id_vars= "Time (sec)", value_vars=
["filtradoSTRAIN_R1","filtradoSTRAIN_R2","filtradoSTRAIN_R4","filtrado
STRAIN_R5","filtradoSTRAIN_R6","filtradoSTRAIN_R7","filtradoSTRAIN_R8"
,"filtradoSTRAIN_R11","filtradoSTRAIN_R12"])

df1 =
df1.rename(columns={'variable':'sinmediasensor','value':'sinmediavalue
'})
df2 =
df2.rename(columns={'variable':'filtradosensor','value':'filtradovalue
'})
df1['filtradosensor']= df2['filtradosensor']
df1['filtradovalue']=df2['filtradovalue']
print(df1)

fig = px.line(df1, x="Time (sec)",
y=['sinmediavalue','filtradovalue'], animation_frame="sinmediasensor",
range_y=[-624,594], title= '1_D1_1_30kmh')
fig.show()

```

## Algoritmo para la identificación de amplitudes máximas de deformación de los registros de las pruebas dinámicas

```
# 1_D1_1_30kmh
import pandas as pd
import plotly.express as px
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from scipy.signal import butter, lfilter
import statistics

def butter_bandpass_filter(data, lowcut, highcut, fs, order=2):
    nyq = 0.5 * fs
    low = lowcut / nyq
    high = highcut / nyq

    b, a = butter(order, [low, high], btype='bandpass', analog=False)
    y = lfilter(b, a, data, axis=0)
    return y

nombre_archivo= "1_D1_1_30kmh.xlsx"
#workbook1 = nombre_archivo+ ".xlsx"
df = pd.read_excel(nombre_archivo)
#df

valores = df[["Time (sec)",
              "STRAIN_R1",
              "STRAIN_R2",
              "STRAIN_R3",
              "STRAIN_R4",
              "STRAIN_R5",
              "STRAIN_R6",
              "STRAIN_R7",
              "STRAIN_R8",
              "STRAIN_R9",
              "STRAIN_R10",
              "STRAIN_R11",
              "STRAIN_R12"
              ]]
```

```
for i in range (1,13):
    print(df.columns[i])
    media=df[df.columns[i]].mean()
    #df['Offset']= promediovalues
    resta= (df[df.columns[i]].values)- (media)
    df['sinmedia'+df.columns[i]]= resta
    filtro=butter_bandpass_filter(resta, 0.01, 1.5, 125, order=2)
    df['filtrado'+df.columns[i]]= filtro
    plt.plot(df[df.columns[0]].values, resta,df[df.columns[0]].values,
filtro)
    #plt.figure(figsize = (20, 20))
    plt.show()
    plt.plot(df[df.columns[0]].values, filtro)
    #plt.figure(figsize = (20, 20))
    plt.show()

    #input("Please press the Enter key to proceed")
```

## Algoritmo para la identificación del tiempo antes y después de la amplitud máxima de deformación

```
# 1_D1_1_30kmh
import pandas as pd
import plotly.express as px
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from scipy.signal import butter, lfilter
import statistics

def butter_bandpass_filter(data, lowcut, highcut, fs, order=2):
    nyq = 0.5 * fs
    low = lowcut / nyq
    high = highcut / nyq

    b, a = butter(order, [low, high], btype='bandpass', analog=False)
    y = lfilter(b, a, data, axis=0)
    return y

#lista = df['filtrado'+df.columns[1]]
def mayor(lista):
    max = float(lista[0]);
    for x in lista:
        if x > max:
            max = x
    return float(max)

def buscar(lista, valor):
    i=0
    j=0
    for x in lista:
        if x == valor:
            j = i
            i=i+1
    return j

def buscar0(lista, valor):
    i=0
    puntomax=len(lista)/2
```

```

lista1=[]
for x in lista:
    #print(i)

    if x > -2 and x<2:
        lista1.append(i)
        #print('entro al if')
    i=i+1

#print(lista1)
jder=0
jizq=0

if len(lista1)!=0:

    jizq=abs(puntomax-int(lista1[0]))
    jder=(int(lista1[0])-puntomax)
    print(puntomax)
    for x in lista1:
        #print(x)
        distizq=abs(puntomax-int(x))
        distder=(int(x)-puntomax)

        if distizq<jizq and x<puntomax:
            jizq=distizq
            #print(jizq)

        if distder>jder and x>puntomax:
            jder=distder
            #print(jder)

    print(puntomax-jizq)
    print(jder-puntomax)
    return int(puntomax-jizq), int(jder-puntomax)

nombre_archivo= "1_D1_1_30kmh.xlsx"
#workbook1 = nombre_archivo+ ".xlsx"
df = pd.read_excel(nombre_archivo)
#df

valores = df[["Time (sec)",
              "STRAIN_R1",
              "STRAIN_R2",

```

```

        "STRAIN_R3",
        "STRAIN_R4",
        "STRAIN_R5",
        "STRAIN_R6",
        "STRAIN_R7",
        "STRAIN_R8",
        "STRAIN_R9",
        "STRAIN_R10",
        "STRAIN_R11",
        "STRAIN_R12"
    ]]

v1=[]
tiempo=[]

for i in range (1,13):
    print(df.columns[i])
    media=df[df.columns[i]].mean()
    #df['Offset']= promediovalues
    resta= (df[df.columns[i]].values)- (media)
    df['sinmedia'+df.columns[i]]= resta
    filtro=butter_bandpass_filter(resta, 0.01, 1.5, 125, order=2)
    df['filtrado'+df.columns[i]]= filtro

#Amplitud máxima
    amplitudmax= mayor(filtro)
    print (amplitudmax)
    posicionamp= buscar(filtro, amplitudmax)

#Tiempo de amplitud máxima
    v1= filtro[posicionamp-375: posicionamp+375]
    print (df[df.columns[0]].values[posicionamp])
    tiempo=df[df.columns[0]].values[posicionamp-375: posicionamp+375]
    buscar0 (v1,0)
    posicion1=buscar0 (v1,0)

    if len(v1) !=0:

        #print(len(v1))
        #print(v1[posicion1])
        print(tiempo[posicion1[0]])
        print(tiempo[posicion1[1]])

```

```

#Ploteos
#Señal filtrada y datos crudos
plt.plot(df[df.columns[0]].values, resta,df[df.columns[0]].values,
filtro)
plt.title("Señal filtrada y datos crudos", loc='center')
#plt.figure(figsize = (15, 10))
plt.show()
#Señal filtrada
plt.plot(df[df.columns[0]].values, filtro)
plt.title("Señal filtrada", loc='center')
#plt.figure(figsize = (30, 20))
plt.show()
#Amplitud máxima con 10 segundos antes y después
plt.plot(tiempo, v1)
plt.title("Amplitud máxima", loc='center')
#plt.figure(figsize = (10, 5))
plt.show()
#Gráfico interactivo
df1= df.melt(id_vars= "Time (sec)", value_vars=
["sinmediaSTRAIN_R1", "sinmediaSTRAIN_R2", "sinmediaSTRAIN_R4", "sinmedia
STRAIN_R5", "sinmediaSTRAIN_R6", "sinmediaSTRAIN_R7", "sinmediaSTRAIN_R8"
, "sinmediaSTRAIN_R11", "sinmediaSTRAIN_R12"])
df2= df.melt(id_vars= "Time (sec)", value_vars=
["filtradoSTRAIN_R1", "filtradoSTRAIN_R2", "filtradoSTRAIN_R4", "filtrado
STRAIN_R5", "filtradoSTRAIN_R6", "filtradoSTRAIN_R7", "filtradoSTRAIN_R8"
, "filtradoSTRAIN_R11", "filtradoSTRAIN_R12"])

df1 =
df1.rename(columns={'variable': 'sinmediasensor', 'value': 'sinmediavalue
'})
df2 =
df2.rename(columns={'variable': 'filtradosensor', 'value': 'filtradovalue
'})
df1['filtradosensor']= df2['filtradosensor']
df1['filtradovalue']= df2['filtradovalue']
print(df1)

fig = px.line(df1, x="Time (sec)",
y=['sinmediavalue', 'filtradovalue'], animation_frame="sinmediasensor",
range_y=[-624,594], title= nombre_archivo)
fig.show()

```

Algoritmo para la identificación y selección de amplitudes máximas de las deformaciones de los registros de las pruebas dinámicas, dominio de frecuencia, armónicos, valor de amplitud máxima y tiempos de la señal filtrada

```
import numpy as np
from scipy import signal
from scipy.signal import find_peaks
from matplotlib import pyplot as plt
from numpy import loadtxt
from scipy.fft import rfft, rfftfreq

import pandas as pd
import plotly.express as px
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.signal import butter, lfilter
import statistics

def buscar(lista, valor):
    i=0
    j=0

    for x in lista:
        if x == valor:
            j = i
            i=i+1

    return j

def buscar0(lista,mayor,tiempo):
    i=0

    puntomax=buscar(lista,mayor)
    tiempo=tiempo[puntomax-375: puntomax+375]
    lista=lista[puntomax-375: puntomax+375]
    puntomax=buscar(lista,mayor)

    plt.plot(tiempo, lista)
    plt.title("Amplitud máxima", loc='center')
    #plt.figure(figsize = (10, 5))
    plt.show()
```

```

lista1=[]
for x in lista:
    #print(i)

    if x > -2 and x < 2:
        lista1.append(i)
        #print('entro al if')
    i=i+1

#print(lista1)
jder=0
jizq=0

if len(lista1)!=0:

    jizq=abs(puntomax-int(lista1[0]))
    jder=(int(lista1[0])-puntomax)
    #print(puntomax)
    for x in lista1:
        #print(x)
        distizq=abs(puntomax-int(x))
        distder=(int(x)-puntomax)

        if distizq<jizq and x<puntomax:
            jizq=distizq

        if distder>jder and x>puntomax:
            jder=distder
    #print("jder")
    #print(jder)
    #print("jizq")
    #print(jizq)
    #print('jizq, jder')

print("tiempo puntomax")
print(tiempo[puntomax])
#print(puntomax-jizq)
#print(jder-puntomax)
print("tiempo antes")
print(tiempo[int(puntomax-jizq)])
print("tiempo despues")
print(tiempo[int(jder-puntomax)])

```

```

return int(puntomax-jizq), int(jder-puntomax)

def frecuencia(movimentol, fm):
    muestreo=fm
    N = len(movimentol)
    yf = rfft(movimentol)
    xf = rfftfreq(N, 1 / muestreo)
    yf=np.abs(yf)
    yf=yf/max(yf)
    plt.plot(xf, yf)
    plt.xlabel('Frecuencia')
    plt.ylabel('Amplitud')
    plt.title('DOMINIO FRECUENCIA')
    plt.show()

    maximo=max(yf)
    pos=np.where(yf==maximo)
    print('Frecuencia fundamental:')
    print(xf[pos])

    #figure()
    #plot(xf, np.abs(yf), label='Slow decay')
    #legend(loc='best')
    #show()

    #data=(xf, np.abs(yf))

    #hv.Scatter(data).opts(width=600)

    return xf, np.abs(yf)

def fftint(x,y):
    h=10
    t='si'
    FF=0
    distancia=100

```

```

    limite=0
    while t=='si':
        #Find peaks
        peaks = find_peaks(y, height = h, threshold = limite, distance
= distancia)
        height = peaks[1]['peak_heights'] #list of the heights of the
peaks
        peak_pos = x[peaks[0]] #list of the peaks positions
        print('Armónicos Hz')
        print(peak_pos)
        #Finding the minima

        #Plotting
        fig = plt.figure()
        ax = fig.subplots()
        ax.plot(x,y)
        ax.scatter(peak_pos, height, color = 'r', s = 15, marker =
'D', label = 'Maxima')
        #ax.scatter(min_pos, min_height*-1, color = 'gold', s = 15,
marker = 'X', label = 'Minima')
        ax.legend()
        ax.grid()
        plt.show()

    print('¿Cambiar valores?')
    t=input()
    print('\n')
    if t=='si':
        print('ingresar valor de h')
        print('valor de h actual es ',h)
        h=input()
        print('\n')
        h=float(h)

        print('ingresar valor de distancia')
        print('valor de distancia actual es ',distancia)
        distancia=input()
        print('\n')
        distancia=int(distancia)

        print('ingresar valor de límite')

```

```

        print('valor de límite actual es ',limite)
        limite=input()
        print('\n')
        limite=int(limite)
    else:
        t=='no'

    return height

def butter_bandpass_filter(data, lowcut, highcut, fs, order=2):
    nyq = 0.5 * fs
    low = lowcut / nyq
    high = highcut / nyq

    b, a = butter(order, [low, high], btype='bandpass', analog= False)
    y = lfilter(b, a, data, axis= 0)
    return y

nombre_archivo= "1_D1_1_30kmh.xlsx"
#workbook1 = nombre_archivo+ ".xlsx"
df = pd.read_excel(nombre_archivo)
#df

valores = df[["Time (sec)",
              "STRAIN_L1",
              "STRAIN_L2",
              "STRAIN_L3",
              "STRAIN_L4",
              "STRAIN_L5",
              "STRAIN_L6",
              "STRAIN_L7",
              "STRAIN_L8",
              "STRAIN_L9",
              "STRAIN_L10",
              "STRAIN_L11",
              "STRAIN_L12"
              ]]

for i in range (1,13):
    print(df.columns[i])

```

```
media=df[df.columns[i]].mean()
#df['Offset']= promediovalues
resta= (df[df.columns[i]].values)- (media)
df['sinmedia'+df.columns[i]]= resta
filtro=butter_bandpass_filter(resta, 0.01, 1.5, 125, order=2)
df['filtrado'+df.columns[i]]= filtro
x,y=frecuencia(filtro,125)
tiempo=np.array(df["Time (sec)"].values)
print(len(tiempo))
valores=fftint(tiempo,filtro)
for j in valores:
    posicion1=buscar0(filtro, j,tiempo)
    print(j)
    #print(tiempo[posicion1[0]])
    #print(tiempo[posicion1[1]])
```