



Certificación ISO 9001:2008 ‡

Sistema Inteligente y protocolos de actuación para monitoreo remoto de puentes

**Luis Álvaro Martínez Trujano
Juan Antonio Quintana Rodríguez
Benjamín Arroyo Ramírez
Francisco Javier Carrión Viramontes
Saúl Enrique Crespo Sánchez
Jorge Alberto Hernández Figueroa
Víctor Manuel Bonilla Ureña
Héctor Miguel Gasca Zamora
Andrés Hernández Guzmán**

**Publicación Técnica No. 464
Sanfandila, Qro, 2016**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Sistema Inteligente y protocolos de actuación para
monitoreo remoto de puentes**

Publicación Técnica No. 464
Sanfandila, Qro, 2016

Esta investigación fue realizada en la Coordinación Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte, por el Dr. Juan Antonio Quintana Rodríguez, el Ing. Luis Álvaro Martínez Trujano, el Dr. Francisco Javier Carrión Viramontes, el M. C. Saúl Enrique Crespo Sánchez, el Ing. Jorge Alberto Hernández Figueroa, el M. C. Víctor Manuel Bonilla Ureña, el Lic. Héctor Miguel Gasca Zamora y el Ing. Andrés Hernández Guzmán.

Se agradece la colaboración del Dr. Miguel Martínez Madrid de la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural y del M. I. Benjamín Arrollo Ramírez del Instituto Tecnológico de Celaya.

Índice

Resumen.....	v
Abstract	vii
Resumen ejecutivo.....	ix
1 Introducción	1
2 Monitoreo y evaluación de puentes	8
2.1 Tipos de monitoreo.....	8
2.1.1 Monitoreo continuo	8
2.1.2 Monitoreo puntual	11
2.1.3 Monitoreo de la integridad estructural.....	12
2.2 Plataforma de desarrollo LabVIEW	16
2.2.1 Introducción a LabVIEW	18
2.2.2 Análisis en línea vs fuera de línea	18
2.2.3 Reducción de información	20
2.2.4 Categoría de análisis	21
2.2.5 Herramientas de análisis	22
3 Metodología para generar el protocolo de actuación.....	23
3.1 Caracterización.....	24
3.1.1 Caracterización de la estructura	24
3.1.2 Caracterización de la aplicación del monitoreo.....	25
3.2 Definición de alarmas	27
3.2.1 Límites normales de operación.....	28
3.2.2 Límites de confort	29
3.2.3 Límites obtenidos durante el proceso constructivo	29
3.2.4 Límites de diseño.....	29
3.2.5 Límite de resistencia de materiales.....	29
3.2.6 Límites basados en Simulación Montecarlo.....	29
3.3 Reuniones con autoridades y responsabilidades	30
3.4 Generación de protocolos de actuación	31
3.5 Elección de plataforma para el Sistema Inteligente de Monitoreo (SIM).....	32
3.6 Programación y calibración del SIM	33

3.6.1	Aseguramiento de la calidad de la información	34
6.6.2	Velocidad de muestreo de datos	34
3.6.3	Recolección, reducción y almacenamiento de la información	35
3.6.4	Visualización en tiempo real	37
3.6.5	Post-procesamiento de datos	37
3.6.6	Herramientas para el análisis de la información	38
3.6.7	Visualización y presentación de la información	39
3.7	Pruebas piloto y validación del SIM.....	39
4	Monitoreo remoto del puente Río Papaloapan	41
4.1	Caracterización.....	41
4.1.1	Caracterización estructural del puente Río Papaloapan	41
4.1.2	Caracterización de la aplicación del monitoreo en el puente Río Papaloapan	43
4.2	Definición de alarmas	46
4.2.1	Instrumentación del puente Río Papaloapan.....	46
4.2.2	Cálculo de los límites de operación normal para las deformaciones instantáneas por carga viva	49
4.2.3	Cálculo de los límites de operación normal para el seguimiento de la medida de deformación por carga viva	55
4.2.4	Cálculo de los límites de operación normal para el seguimiento del valor medio de la tensión axial en los tirantes	59
4.3	Reunión con las autoridades y responsables	64
4.4	Generación de protocolos de actuación	65
4.4.1	Diagrama de flujo para el primer nivel de alarma	66
4.4.2	Diagrama de flujo para el segundo nivel de alarma	72
4.5	Elección de la plataforma de programación	75
4.6	Programación y calibración del sistema inteligente de monitoreo	77
4.6.1	Emulación de la adquisición de datos de los extensómetros instalados en el puente Río Papaloapan	78
4.6.2	Pre-procesamiento: Filtro pasa banda.....	82
4.6.3	Determinación de evento extraordinario en los sensores de deformación para el primer nivel de alarma	89
4.6.4	Comparar señal filtrada de sensores de deformación Contra los límites de operación normal.....	90
4.6.5	Almacenamiento de información de la alarma	91

4.6.6	Almacenamiento de datos del evento extraordinario registrados por los sensores de deformación	92
4.6.7	Almacenamiento de video en un evento extraordinario registrado por los sensores de deformación	96
4.7	Pruebas piloto y validación del sim en el puente Río Papaloapan.....	102
5	Análisis de resultados	105
5.1	Re-encarpetado asfáltico.....	105
5.2	Falla en tirante 1 de semi-arpa 5.....	113
6	Conclusiones	123
	Bibliografía	125

Resumen

El Centro de Monitoreo de Puentes y Estructuras Inteligentes (CMPEI) tiene como objetivo la evaluación estructural de los puentes mexicanos instrumentados por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT); para satisfacer el objetivo es necesario analizar, en tiempo real, la información de los sensores instalados en conjunto con la aplicación de metodologías para la detección oportuna de daño y la generación de esquemas de actuación. Esta investigación tiene como finalidad establecer una metodología para generar protocolos de actuación a corto, mediano y largo plazo en los puentes monitoreados por CMPEI.

El trabajo presenta una metodología de siete etapas que conforman el desarrollo e implementación de protocolos de actuación ante eventos o tendencias inusuales que se manifiesten en un comportamiento estructural atípico o degeneren la condición estructural de los puentes. La evaluación del comportamiento estructural de los puentes se realiza mediante un Sistema Inteligente de Monitoreo (SIM), programado en LabVIEW, el cual permite dar seguimiento a los eventos que provocan una respuesta diferente a las condiciones de operación normal de la estructura en coordinación con las autoridades responsables de la conservación y mantenimiento de los puentes y las autoridades responsables de la seguridad de los usuarios. La aplicación de la metodología de estudio se realizó en el puente Río Papaloapan obteniendo como resultado la implementación de los protocolos de actuación en tiempo real, a través de la definición de los límites para la activación de las alarmas y la administración automática de los datos del monitoreo y el seguimiento de las alarmas. El SIM es la primera y única plataforma desarrollada e implementada en nuestro país dedicada a la gestión automática de los datos en el monitoreo remoto de estructuras.

Abstract

Monitoring Center for Intelligent Structures and Bridges has as an objective the structural evaluation of the mexican instrumented bridges by the Mexican ministry of transportation, to satisfy the objective, it is necessary to analyze in real time information from the sensors installed in conjunction with the application of methodologies for early damage detection and action protocols in the short, medium and long term for the monitored bridges.

This paper presents a seven step methodology of in order to develop and implement the action protocols for unusual events or trends that generate atypical structural behavior or structural degradation of bridges.

The structural behavior evaluation of bridges is executed by an Intelligent Monitoring System (IMS) programmed in LabVIEW, which allows monitoring the events that cause a different response from those which are normal operating conditions in coordination with authorities in charge of bridge maintenance and the authorities responsible for user security. The methodology was applied in Puente Rio Papaloapan with implementation of action protocols in real time through definition of the limits to activate alarms and automatic management of data monitoring and tracking of alarms. The SIM is the first and unique platform developed and implemented in Mexico dedicated to automatic data monitoring management for bridges.

Resumen ejecutivo

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) cuenta con el Sistema de Puentes de México (SIPUMEX), el cual es un sistema integral para planificar la conservación de la infraestructura a partir de una calificación otorgada por técnicos especializados, quienes realizan inspecciones visuales a los puentes. Cabe destacar que el promedio de vida de los siete mil doscientos puentes que conforman la red federal de carreteras es de 39 años; incluyendo los más recientes que han sido construidos con altas especificaciones técnicas, tales como los puentes Río Papaloapan, Chiapas, y Tampico. Asimismo, es importante señalar que la mayoría de los puentes están ubicados en zonas de alto riesgo ambiental que justifican el monitoreo permanente; particularmente por los cambios climáticos, caída de lluvias torrenciales y huracanes que cada vez son más severos.

Si bien es cierto que el SIPUMEX es una herramienta que ha sido útil para administrar los puentes mexicanos, éste puede ser mejorado y actualizado aprovechando la tecnología más reciente y considerando que existen riesgos que no pueden ser detectados por las inspecciones visuales. Una solución es establecer un Centro de Monitoreo de Puentes y Estructuras Inteligentes (CMPEI) mediante el cual se puede obtener, procesar y analizar la información de cada uno de los puentes instrumentados. El éxito del monitoreo está en el análisis e interpretación de la información a través de un sistema automático que procese los datos de los sensores, aplique metodologías de detección de daño, genere esquemas de actuación para conservar la integridad estructural y garantice la seguridad de los usuarios.

Para la evaluación oportuna que minimice los costos de mantenimiento y preserve la integridad del puente y seguridad de los usuarios, es importante el desarrollo de un Sistema Inteligente de Monitoreo que de manera automática procese los datos de los sensores y mediante el análisis de la información genere un esquema de actuación inmediata, de corto, mediano y largo plazo, ante eventos o tendencias inusuales en los parámetros estructurales del puente. Para cumplir con estas expectativas es necesario generar protocolos de actuación ante tales eventos en coordinación con las autoridades responsables de la seguridad, el mantenimiento y conservación de la infraestructura carretera.

La siguiente metodología se establece con el fin de generar los protocolos de actuación. Dicha metodología consta de siete etapas que se plasma de manera general, por lo cual puede ser empleada como lineamientos para establecer protocolos de actuación en cualquier estructura monitoreada en tiempo real. Los objetivos que persiguen cada etapa de la metodología son:

- 1) Caracterización: Persigue tanto la conceptualización y la comprensión de la estructura, así como los objetivos de la aplicación del monitoreo.
- 2) Definición de alarmas: Permite evaluar por cada parámetro de medición, los límites de operación de los sensores que sean indicativos de un síntoma anormal de operación, deterioro o daño que comprometa el servicio, la seguridad o la confiabilidad de la estructura.
- 3) Reuniones con autoridades y responsables: Busca establecer las perspectivas, incertidumbres y expectativas de la implementación del monitoreo, así como precisar tanto la relevancia como las acciones pertinentes a realizar por cada una de las personas involucradas en la conservación de la infraestructura y seguridad de los usuarios.
- 4) Generación de protocolos de actuación: Se plasma y desarrolla la normativa que establece cómo se debe actuar ante ciertos eventos o fenómenos que se presente en la estructura y que, por supuesto, impacten de manera negativa al servicio, la seguridad o la confiabilidad de la misma.
- 5) Elección de la plataforma para el SIM: Permite determinar el mejor lenguaje de programación que se adapte a las necesidades del monitoreo y ejecución de los protocolos de actuación con base en la compatibilidad del hardware empleado, las características de análisis a ejecutar y las habilidades de la persona encargada de la programación.
- 6) Programación y calibración del SIM: Contempla las actividades y características a considerar en el desarrollo e implementación del Sistema Inteligente de Monitoreo. Además de las propias rutinas inherentes a la programación.
- 7) Pruebas piloto y validación: Evaluación del sistema de monitoreo completo, incluyendo los diversos sensores, hardware de adquisición de datos, sistema de video, SIM y protocolos de actuación mediante pruebas a menor escala o emulación de escenarios.

El Puente Río Papaloapan es el primer puente instrumentado y monitoreado por el Centro de Monitoreo de Puentes y Estructuras Inteligentes (CMPEI). En el futuro se pretende monitorear 10 puentes importantes para el país entre los cuales están los puentes Baluarte, Mezcala, Chiapas, Tampico, Dovalí Jaime, San Cristóbal, Infiernillo II y Quetzalapa. La información de cada uno de estos puentes será analizada, evaluada y almacenada en el CMPEI.

Por el momento, la metodología propuesta es implementada en el puente Río Papaloapan para posteriormente ser empleada en los siguientes puentes instrumentados del país. A continuación, se describe cada una de las etapas de la metodología propuesta en el proceso de aplicación en el puente Río Papaloapan.

1 Introducción

El Monitoreo de la integridad Estructural o SHM (*Structural Health Monitoring*, por sus siglas en inglés) puede definirse como el proceso en el cual las estrategias de detección de daños son implementadas en las infraestructuras aero-espaciales, mecánicas y civiles. Las primeras técnicas de monitoreo fueron efectuadas en las estructuras aero-espaciales, como naves espaciales y aviones, por la necesidad de monitorear las condiciones imperantes en el vuelo, emitir alertas tempranas si se detectan fallas; con el objetivo de salvaguardar la vida humana.

La NASA está permanentemente en tareas de lanzamiento de naves y vuelos espaciales, lo que implican una alta sensibilidad en el monitoreo de las estaciones de lanzamiento, del fuselaje y de las superficies de control de las aeronaves, a fenómenos de desgaste y fatiga de materiales [Hunt et al., 1990].

Desde los años sesentas del siglo pasado ya se aplicaban métodos de pruebas dinámicas de vibración libre o forzada para estudiar el comportamiento dinámico de las estructuras con especial énfasis en los edificios. En estos estudios de tipo académico se buscaba obtener los períodos naturales de oscilación y la razón de amortiguamiento. Sin embargo, el tema propiamente de monitoreo de la integridad de la infraestructura civil no tomó fuerza sino hasta los comienzos de los años noventa debido a varias razones:

- La necesidad de determinar el estado de deterioro de las estructuras civiles de gran envergadura, ya que algunas se aproximan a la etapa final de su vida útil.
- En términos de gestión, manejo y mitigación de las amenazas de los desastres, una base de datos que provee información sobre el estado de las estructuras civiles pre- y post-desastre es crucial para la planificación y la toma de decisiones de las autoridades.
- Cada vez hay más estructuras en el mundo como los puentes de gran tamaño o con características especiales que constituyen líneas vitales de tránsito para muchas ciudades. Su operación no puede ser interrumpida y garantizar su funcionamiento es un asunto crítico. Es necesario, entonces, un sistema de monitoreo continuo para detectar daños en tiempo real e implementar medidas correctivas a tiempo antes de que el daño se agrave o se extienda.

Todos estos hechos impulsaron un gran esfuerzo a nivel internacional en la investigación y se han tenido avances en el desarrollo de sistemas inteligentes de

detección de daño, sistemas de monitoreo basados en sensores de fibra óptica, sensores inalámbricos, sensores innovadores que emplean nuevos métodos de procesamiento de señales e identificación de parámetros dinámicos de las estructuras, entre otros. Sin embargo, dada la complejidad que se presenta en las estructuras civiles, aún hay muchos retos por enfrentar y problemas por superar.

En Estados Unidos, alrededor del 50% de los puentes fueron construidos antes de 1940, de los cuales el 27% presentan deficiencias estructurales [Atkan et al., 2001]. Tal es el caso del colapso del puente I-35W que cruzaba el río Mississippi (Minneapolis, USA) causado por la carga vehicular en una hora de gran aglomeración de tránsito, el primero de agosto del 2007, ver figura 1.1. En Japón, uno de los últimos grandes terremotos ocurridos, fue el terremoto de Kobe (Magnitud 7.2 en la escala de Richter, 1995), que dejó cerca de 5500 personas muertas y otras 26000 heridas, y pérdidas económicas por 200 billones de dólares. Durante el sismo colapsó la autopista elevada de *Hanshin* (Kobe, Japón).



Figura 1.1 Colapso de puente vial I-35W en Minneapolis, USA.

Lo anterior apunta al desarrollo de sistemas que puedan monitorear la integridad de una estructura y proporcionar un conocimiento *a priori* del posible daño frente a una determinada excitación o influencia dinámica, asunto que ha surgido como pieza fundamental en importantes líneas de investigación en ingeniería civil, ingeniería mecánica y aeroespacial, y que en los últimos años ha sido base para el desarrollo de campos de investigación como la evaluación no destructiva (NDE–*Non-destructive Evaluation*), monitoreo de condición (CM –*Condition Monitoring*), monitoreo de la integridad estructural (SHM–*Structural Health Monitoring*) y predicción del daño (*Damage Prognosis*), entre otros [Sohn et al., 2004]. En términos prácticos, esto se ha plasmado a través de la colocación de sensores

sobre las estructuras, capaces de proveer datos en tiempo real y, con estos datos, establecer si hay o no daño y realizar la valoración estructural correspondiente.

En 2013 Bentley Systems desarrolló una plataforma llamada *InspectTech* para recolección y administración de la información generada por 13000 puentes que son monitoreados e inspeccionados a cargo del Departamento de Transportes de Minnesota (MnDOT). Más aún, cuando el gobierno central exige una inspección y un reporte detallado de cada uno de ellos en períodos de dos años, la necesidad de dejar de lado archivos Excel, Word y bases de datos Access es imperativa.

La plataforma presenta una solución centralizada de fácil acceso para los inspectores. El sistema consiste en dos módulos claramente definidos:

- **Módulo de inspección:** Desarrollado en una plataforma web siendo ejecutado en computadoras portátiles y tabletas conectados vía internet con las oficinas centrales, pero también con la capacidad de trabajar desconectados de ella. Este programa contiene todos los formularios digitales requeridos para la inspección para después generar el reporte final.
- **Sistema de administración:** Realizado en plataforma web, lo cual no precisa de un programa de instalación y puede ser ejecutado desde cualquier computador si se tienen las correspondientes claves de acceso. Este módulo permite la revisión y control de calidad de la inspección realizada y además permite al personal del estado y consultores privados a cargo, acceder en tiempo real la información de la estructura, posicionamiento global, registros históricos, reportes, fotografías, videos, órdenes de mantenimiento, etc.

Luego de aprobado el informe final, la información se hace disponible a través de pantallas de análisis ejecutivas (*dashboards*) para los diferentes departamentos involucrados en el ciclo de vida de la estructura, tales como tránsito, planeación, mantenimiento, diseño, entre otros.

En México se han desarrollado propuestas de plataformas de monitoreo estructural, aunque son de manera conceptual, en 2013 se da a conocer SAVER (*Structural Analysis of VulnerabilityEs of buildings through wiREless sensor networks*), el cual es un sistema integrado exclusivamente por acelerómetros inalámbricos y un sistema de monitoreo-análisis de la información, el sistema cuenta con los siguientes módulos:

- **Data Analyzer:** Este módulo transforma los datos enviados por la red de sensores a formato estándar internacional (IS). Una vez efectuada la “traducción” de datos se procede al almacenamiento de los mismos en el módulo *Data Repository*.

- *Data Repository*: Es un servidor de base de datos relacional que se encarga de administrar los datos y consultas hechas por los otros módulos de la plataforma.
- *Structural Vulnerabilities Analyzer*: Este módulo, uno de los más robustos de la plataforma, realiza procesamiento y análisis de los registros provenientes del módulo *Data Repository*, además estima el nivel de daño físico del sistema estructural de la estructura de interés.
- *WSN monitoring Mobile Application*: Es una aplicación para celulares que permite el monitoreo estructural en tiempo real. Una de las características más importantes de este módulo es que notifica al usuario sobre el nivel de daño de la estructura instrumentada.
- *Web based WSN monitoring platform*: Es una plataforma WEB que permite el monitoreo y visualización, en tiempo real, de los parámetros de los sensores de aceleración. Esta plataforma permite la generación de estadísticas, gráficas, etc. Además de la visualización de los parámetros de los sensores y su posición dentro del edificio. De la misma forma, notifica y despliega la visualización del nivel de vulnerabilidad estructural del edificio.
- *Notification System*: Este módulo envía alertas sobre la estructura del edificio vía e-mail y SMS. Estas notificaciones son de gran importancia en caso de la ocurrencia de algún evento sísmico de intensidad considerable.
- *Retrofit Rehabilitation Strategies*: Este módulo, aunque no es parte de la plataforma, se refiere a las medidas y recomendaciones que deberán efectuarse para la rehabilitación del edificio en caso de que el daño estimado supere un umbral pre-establecido y además se corrobore mediante métodos detallados.

SAVER tiene el objetivo de recabar información útil para establecer el nivel de daño o de la integridad estructural de construcciones existentes, además se pretende que la información pueda ser usada para la toma de decisiones tanto en esquemas o programas de prevención, así como para cuando se utilice en una evaluación post-sísmica.

Otro caso en México se realizó en el año 2013 para el monitoreo estructural del puente “El Carrizo”, el cual se observa en la figura 1.2, el puente está ubicado en la autopista Durango-Mazatlán. El objetivo principal del monitoreo fue verificar la adecuada concepción y construcción del puente, mediante la evaluación de la respuesta estructural ante cargas de estáticas como dinámicas. En este caso se instrumentó el puente con sensores de fibra óptica basados en rejillas de Bragg. Esta instrumentación comprendió la instalación y colocación de 24 sensores para medir los efectos producidos por las cargas dinámicas y efectos térmicos en la superestructura del puente, tales como las deformaciones y esfuerzos en las vigas principales, deflexiones máximas en los principales claros; además, medir las

vibraciones, producidas por cargas ambientales y las debidas al paso de la carga vehicular. El análisis de los datos del monitoreo consistió en comparar los valores registrados por los sensores con los generados por un modelo de elemento finito basado en el programa SAP2000.



Figura 1.2. Puente el Carrizo.

Hasta el momento en México no se ha desarrollado una plataforma que automáticamente emita una alarma con información relevante cuando se presente o detecte alguna anomalía en la estructura.

El éxito del monitoreo está en el análisis e interpretación de la información a través de un sistema automático que procese los datos de los sensores, aplique metodologías de detección de daño, genere esquemas de actuación para conservar la integridad estructural y garantice la seguridad de los usuarios.

Mediante la implementación de un sistema inteligente de monitoreo es posible ejecutar procedimientos sistemáticos de actuación ante eventos o tendencias inusuales en los parámetros estructurales del puente que minimicen los tiempos de respuesta de las autoridades responsables del puente para la toma de decisiones y con ello salvaguardar la vida e integridad tanto de los usuarios como del puente, además de minimizar los costos de mantenimiento por la detección oportuna de daño.

En el caso de la infraestructura civil, donde el alto costo de construcción y que, en muchos casos, luego de presentarse algún evento atípico se vuelve imperativo conocer el estado estructural, se hace necesaria la implementación de estrategias para la evaluación de la integridad estructural y detección oportuna de daño. Los puentes están expuestos durante su vida útil a numerosos factores que afectan su funcionalidad, tales como terremotos, huracanes, interacciones viento-estructura,

o deterioro de sus elementos por fatiga; por lo tanto, se vuelve prioritario valorar la condición del puente bajo estándares de servicio y seguridad.

La importancia de la infraestructura vial en México hace necesario desarrollar estrategias para su conservación, mantenimiento y seguridad de los usuarios. El Instituto Mexicano del Transporte se ha preocupado por establecer metodologías para evaluar la integridad, detectar daño oportuno y establecer la vida útil de los puentes más importantes en nuestro país mediante la instrumentación y monitoreo permanente de los parámetros estructurales críticos en los puentes.

A finales del año 2012 se llevó a cabo la instrumentación del puente Río Papaloapan empleando 24 extensómetros para medir deformaciones en concreto, 24 acelerómetros instalados en los tirantes 4 y 11 de cada semi-arpa, ocho inclinómetros instalados en par por cada una de las cuatro pilas, 32 sensores de temperatura, un sensor de desplazamiento para medir el cambio longitudinal de la junta de expansión, dos cámaras de video, una estación climatológica y una estación sismológica. Todo el sistema de monitoreo se encuentra energizado mediante un sistema eléctrico independiente que consta de 96 celdas fotovoltaicas distribuidas en las caras de las pilas ubicadas aguas abajo. A partir de mayo de 2013 comenzaron las actividades de ajuste del sistema de adquisición de datos y las pruebas de comunicación remota hacia el IMT usando un módem 3G.

El puente Río Papaloapan es el primer puente instrumentado y monitoreado por el Centro de Monitoreo de Puentes y Estructuras Inteligentes (CMPEI). Se pretende monitorear 10 puentes importantes para el país, los cuales fueron seleccionados debido a factores tales como la inversión realizada, la actividad económica, tamaño, características especiales de diseño o porque han presentado problemáticas durante su construcción u operación, entre los cuales están los puentes Baluarte, Mezcala, Chiapas, Tampico, Dovalí Jaime, San Cristóbal, Infiernillo II y Quetzalapa. La información de cada uno de estos puentes será analizada, evaluada y almacenada en el CMPEI.

Para la evaluación oportuna y toma de decisiones es importante el desarrollo de un Sistema Inteligente de Monitoreo que, de manera automática, procese los datos de los sensores y mediante el análisis de la información genere un esquema de actuación inmediata, de corto, mediano y largo plazo. Para cumplir con estas expectativas es necesario generar protocolos de actuación ante tales eventos en coordinación con las autoridades responsables de la seguridad, el mantenimiento y conservación de la infraestructura carretera. Aunque es un campo de poco estudio en México, es importante iniciar el trabajo de investigación en esta área para que estos conocimientos y experiencias acumuladas puedan aplicarse en la realidad de nuestro país.

Al finalizar el proyecto se habrá desarrollado una metodología para generación de protocolos de actuación para los puentes del CMPEI, en donde en una tabla se concentrarán los criterios y parámetros para la activación de alarmas. Además del

respectivo Sistema Inteligente de Monitoreo acondicionado al Puente Río Papaloapan.

Mediante la implementación de un Sistema Inteligente de Monitoreo se ejecutarán procedimientos sistemáticos de actuación ante eventos atípicos o tendencias inusuales en los parámetros estructurales del puente, que minimicen los tiempos de respuesta de las autoridades responsables del puente para la toma de decisiones y con ello salvaguardar la vida e integridad tanto de los usuarios como del puente, además de minimizar los costos de mantenimiento por la detección oportuna de daño.

2 Monitoreo y evaluación de puentes

El ciclo de vida de una estructura civil comienza con la construcción, seguida de una etapa continua de operación y rehabilitación y termina con la demolición de la estructura. Durante la etapa de operación y rehabilitación, el monitoreo estructural es esencial para garantizar la seguridad y confiabilidad de las estructuras civiles. Para la evaluación de la condición estructural, tanto la carga actual como las condiciones estructurales presentes, deben ser tomados en consideración. La premisa más importante para una evaluación fiable es la disponibilidad de información real de manera oportuna.

En las últimas décadas, además de los métodos de inspecciones visuales, se han introducido procedimientos experimentales que permiten la valoración global de la estructura. Estas estrategias proporcionan una relación real entre la carga y la vida remanente a través de mediciones específicas. Los avances en las tecnologías de fabricación de sensores, junto con las aplicaciones de las tecnologías de la información y el análisis de datos, han contribuido de manera significativa al desarrollo del monitoreo estructural.

2.1 Tipos de monitoreo

Las estrategias empleadas para el monitoreo de estructuras se clasifican en tres tipos: el monitoreo continuo, el monitoreo puntual y el monitoreo de la integridad estructural.

2.1.1 Monitoreo continuo

Realizar el monitoreo continuo implica dejar colocados los instrumentos en la estructura en forma permanente, lo cual significa una inversión que permanece en ella. En caso de los sensores de fibra óptica, éstos quedarán adheridos rígidamente o embebidos dentro de la estructura y difícilmente pueden ser reutilizados.

En forma general se pueden establecer tres etapas para el monitoreo continuo:

- Evaluación preliminar, construcción y calibración del modelo de los elementos finitos del puente: Esta etapa consiste en identificar la tipología del puente, las necesidades de monitoreo (por ejemplo: asentamiento o inclinación de la pila, deflexión de la viga, deterioro de la losa, fatiga, pérdida de tensión en los cables, esfuerzo o deformación de algún miembro o parte crítica del puente, entre otros.), la elección de los sensores y del sistema de transmisión de datos que logren satisfacer las necesidades identificadas, sin dejar de lado la factibilidad de su instalación. La

construcción del modelo de los elementos finitos es indispensable para identificar los miembros estructurales o zonas críticas. No obstante, el modelo debe ser antes validado por medio de técnicas de identificación de sistemas (utilizando una buena resolución espacial de acelerómetros y mediante pruebas dinámicas) para asegurar que el modelo analítico sea lo suficientemente exacto como para representar y predecir el comportamiento del puente real ante diferentes cargas, esto para garantizar que los sensores sean instalados en los miembros estructurales o zonas críticas ante diferentes escenarios de solicitaciones.

- Instalación de los instrumentos de medición y el sistema de adquisición de datos: Al tener ubicado en la etapa anterior los puntos estratégicos de monitoreo y las variables a medir, lo que procede en esta etapa es el proceso de instalación en sí, considerando siempre la factibilidad y las futuras necesidades de mantenimiento o sustitución de sensores en caso de averías. La fuente de poder para el sistema y los sensores es un asunto crítico. Se puede considerar el uso de baterías recargables con energía solar o vibración procedente de la misma estructura; en cambio, para el nodo *host* o anfitrión debe proveerse energía continua, al igual que el sistema de fibra óptica.
- Procesamiento, interpretación y administración de los datos: En un proyecto de monitoreo continuo se obtendrán una gran cantidad de datos, es importante el buen manejo y almacenamiento de los mismos. Por otro lado, para efectuar el procesamiento e interpretación de datos es necesario la implementación de software de análisis en la computadora del usuario final.

El monitoreo continuo requiere generalmente de una combinación de métodos globales y locales de monitoreo y la implementación de técnicas de detección de daño. Dado que es un monitoreo continuo y el tráfico no puede ser interrumpido, las técnicas de monitoreo de la integridad estructural basadas en vibraciones y propagación de ondas son algunos de los métodos globales empleados. En la figura 2.1 se muestra un acelerómetro de fibra óptica montado en un tirante del puente Río Papaloapan, este instrumento mide vibración en un eje y mediante procesamiento de señales se calcula la tensión axial a la que está sometido el tirante.

El método global permite conocer el estado de la estructura mediante comparación de escenarios de daño a través de las respuestas dinámicas generadas con el modelo de los elementos finitos y comparadas con las señales dinámicas experimentales registradas por el sistema de monitoreo instalado. Por otro lado, la aplicación de métodos locales como la medición directa de deformaciones unitarias en ciertos elementos estructurales o conexiones, o la inclinación y asentamiento de las pilas, requiere de una identificación previa, en la primera etapa, de los elementos estructurales y parámetros críticos cuyo buen funcionamiento es indispensable para la integridad o seguridad de toda la estructura. Los sensores de temperatura pueden ser instalados en diferentes

puntos estratégicos del puente para conocer los gradientes de temperatura que se suscitan en él.



Figura 2.1 Acelerómetro instalado en tirante del puente Río Papaloapan.

En general, el procesamiento de señales de varios sensores de manera simultánea requiere de técnicas más complejas; esto, en términos de métodos globales. En cambio, las señales de la deformación unitaria, grados de inclinación y desplazamiento de las pilas para el monitoreo de la socavación o asentamiento y la temperatura son mediciones que pueden ser interpretadas y comparadas, directamente, contra el valor permisible según el modelo analítico del puente y las propiedades mecánicas del material.

Comúnmente, antes de implementar un sistema de monitoreo continuo en una estructura, se debe realizar previamente una evaluación en forma exhaustiva para determinar las propiedades dinámicas reales de la estructura (por ejemplo: la obtención de los parámetros modales o validación del modelo de los elementos finitos de la estructura), para luego, integrar esta información básica como antecedente para la interpretación de los resultados.

2.1.2 Monitoreo puntual

Este monitoreo se centra en las pruebas de cargas que se realizan a los puentes u otras estructuras. Estas pruebas son importantes cuando se encuentran con miembros estructurales deteriorados o dañados, para los cuales es difícil cuantificar los efectos del deterioro o daño en la capacidad de carga de un puente y en la distribución resultante de cargas. Por otro lado, en el caso de estructuras reforzadas o las que se les ha realizado mantenimiento, también se desconoce por completo la eficacia de la reparación y la interacción entre los elementos reforzados con los elementos existentes, para los cuales las pruebas de carga son indispensables para identificar el comportamiento real del puente. La figura 2.2 muestra un deflectómetro de impacto empleado en pruebas de carga realizadas en el puente Río Papaloapan, este equipo libera desde una altura controlada, una

masa conocida, generando un impacto que, a su vez, provoca una deflexión en la superficie; a través de unos geófonos se registran las deflexiones producidas y se asocian con la carga liberada.



Figura 2.2 Deflectómetro de impacto en las pruebas de carga del puente Río Papaloapan.

Se pueden establecer, básicamente, tres propósitos para la evaluación puntual y pruebas de carga no-destructivas:

- Estimar la capacidad de carga real del puente.
- Estudiar el comportamiento real del puente en forma global o ciertos componentes estructurales; además, validar el modelo estructural analítico del puente.
- Detectar, localizar, cuantificar el grado de daños y estimar la vida útil del puente o de cierto componente estructural.

Las pruebas de carga dinámicas en el campo pueden ofrecer una estimación más realista del factor de impacto de acuerdo con las condiciones reales de rugosidad de la superficie de rodadura y las características del tráfico, por las que se puede obtener una estimación más precisa de la capacidad real de carga en el puente.

2.1.3 Monitoreo de la Integridad Estructural

El concepto de Monitoreo de la Integridad Estructural o SHM, *Structural Health Monitoring* (por sus siglas en inglés), se ha desarrollado dentro de un marco conceptual bastante novedoso denominado “Sistemas Estructurales Inteligentes” [82], los cuales son sistemas dotados de habilidades semejantes a los que posee el mundo biológico, dentro de las cuales se puede hablar básicamente de tres componentes: detección (“sensing” en inglés), procesamiento de información y

reacción o adaptación ante el evento. Aún más, si es posible, se busca integrar la función de auto-sanación. El objetivo a largo plazo de las investigaciones en SHM es que la infraestructura civil esté dotada de, por lo menos, las primeras dos funciones en forma integral y que provea informaciones claves para la toma de decisiones de parte de los ingenieros. En la figura 2.3 se muestran de manera general las características básicas que intervienen en el monitoreo de la integridad en una estructura.



Figura 2.3 Estrategia general del monitoreo de la integridad estructural.

Para conferirle a la estructura la capacidad de detección automática, es necesario colocar una red de sensores y que cada sensor esté ubicado en posiciones estratégicamente seleccionadas para captar la información necesaria que permita conocer el estado estructural en diferentes instantes de tiempo. Las señales captadas por los sensores son luego recolectadas por un sistema de adquisición de datos. Al final, lo más importante es proveer un “cerebro” a la estructura que permita filtrar, procesar, sintetizar y analizar la información recolectada, trabajo que será ejecutado por una computadora. La información sintetizada luego es enviada al ingeniero responsable del monitoreo para la toma de decisiones.

Los métodos de monitoreo de integridad estructural pueden clasificarse en dos grandes grupos:

- a) Métodos globales: Definen la presencia y la localización de un daño a partir de la dinámica de la estructura.
- b) Métodos locales: Se basan en pruebas experimentales e inspecciones visuales, tales como métodos de ultrasonido, métodos de campos magnéticos, entre otros. Estos métodos locales necesitan un conocimiento *a priori* de la localización del daño, además que la sección estructural que se va a revisar sea accesible para el operador encargado de la revisión visual (Sohn et al., 2004).

De forma general, se puede decir que el SHM puede ser aplicado a los siguientes casos (Brownjohn, 2007):

- Modificaciones de una estructura ya existente.
- Monitoreo del estado de una estructura afectada por cargas externas.
- Monitoreo del estado de una estructura en procesos de demolición
- Valoración estructural de sistemas sujetos durante largo tiempo a movimientos o a degradación de materiales.
- Mejoramiento del diseño estructural basado en adquisición de datos.
- Valoración de fenómenos de fatiga en materiales.
- Desarrollo de nuevos sistemas de construcción.
- Valoración de la integridad estructural después de fuertes incidencias dinámicas, tales como terremotos.
- Desarrollo de esquemas de diseño basado en desempeño estructural.

Por ello, el monitoreo de la integridad estructural se hace atractivo para el desarrollo de una nueva generación de estructuras inteligentes, que sean capaces de monitorear su condición o integridad en tiempo real y con numerosas ventajas en su desempeño como son (Sohn et al., 2004):

- Reducción en la probabilidad de falla debido a fenómenos inesperados, como catástrofes naturales o daño progresivo de materiales entre periodos de inspección.
- Reducción en los gastos de mantenimiento de estructuras, al pasar al paradigma de mantenimiento basado en la condición.
- Reducción en el costo de materiales por el sobre diseño de estructuras.
- La posibilidad de monitorear y reparar estructuras remotas.
- La valoración de sistemas estructurales luego de desastres naturales.

Según Sohn (2004), el proceso de SHM puede describirse como un paradigma de reconocimiento de modelos estadísticos que consta de cuatro partes:

I Evaluación operacional.

- Identificar el tipo de daño que se desea monitorear. Por ejemplo: el estado general de la estructura o una parte específica de ella como la rigidez de las losas.
- Identificar factores ambientales y del sistema estructural que influirán en los resultados. Por ejemplo: la variación de la temperatura, los tipos de cargas presentes, tipo de sistema estructural y su material.
- Limitaciones en la adquisición de datos durante la operación. Por ejemplo: hay puentes cuyo tránsito nunca puede ser interrumpido.
- Definir los objetivos de mediciones en el monitoreo. Por ejemplo: la deflexión máxima, los parámetros modales como las frecuencias naturales de vibración, entre otros.

II Adquisición, integración y discriminación de datos.

- Selección del tipo, la cantidad y la ubicación de los sensores. Por ejemplo: acelerómetros, transductores de deformación, inclinómetros, extensómetros, etc.
- Selección del sistema de adquisición de datos. Por ejemplo: el sistema alámbrico es recomendado para hacer evaluaciones rápidas y cuando no hay suministro continuo de energía eléctrica. La ubicación de los sensores debe basarse en una evaluación exhaustiva previa para que la información permita inferir sobre el estado global de la estructura.
- Integración y selección de la información de múltiples sensores. Por ejemplo: sincronización de los datos, integración de información de múltiples canales; por ejemplo, aceleración, inclinación o deformación unitaria.
- Filtros y re-muestreo de datos digitales. Para mediciones de aceleraciones, generalmente se requiere de un filtro pasa bajas, pues los acelerómetros, en sí, amplifican las señales de frecuencias altas; careciendo de un filtro pasa bajas la señal será contaminada por el exceso de ruido de alta frecuencia.

III Extracción de características y condensación de información.

- Identificación de patrones característicos del daño a partir de señales digitales.
- Técnicas de procesamiento de señales.

- Identificación de parámetros del modelo dinámico (identificación de sistemas).

IV Desarrollo del modelo estadístico para la discriminación de patrones

- Selección del parámetro más sensible al tipo de daño que se desea monitorear. Por ejemplo: deflexión máxima, parámetros modales como las frecuencias naturales de vibración, inclinación de pilas, gradientes térmicos, cambio en las rigideces o flexiones, etc.
- Selección del modelo estadístico adecuado para el parámetro escogido.
- Establecimiento de índices de daño con criterios estadístico-probabilísticos.
- Modelos de inferencia sobre la vida útil residual de una estructura dañada.
- Construcción de la curva de deterioro de la estructura en el tiempo.

2.2 Plataforma de desarrollo LabVIEW

LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) es un sistema de desarrollo basado en programación gráfica orientado a desarrollar aplicaciones para instrumentación que integra una serie de librerías para comunicación con instrumentos electrónicos como GPIB, RS232 o RS485 con tarjetas de adquisición de datos, sistemas de adquisición y acondicionamiento como VXI o SCXI, comunicaciones en redes TCP/IP, UDP, o en los estándares de software COM, OLE, DDE, DLL o ActiveX para Windows, así como AppleEvents para MacOS o PIPE para UNIX.

A los programas realizados en LabVIEW se les nombra instrumentos virtuales, identificado comúnmente por sus siglas en inglés VI, ya que tienen la apariencia de instrumentos reales, sin embargo, poseen analogías con funciones provenientes de lenguajes de programación convencionales. En la figura 2.4 se observan algunos gráficos que LabVIEW permite emplear como herramientas de visualización, desde gráficas de líneas, gráficas de barras, indicadores de nivel hasta indicadores tipo manómetros.

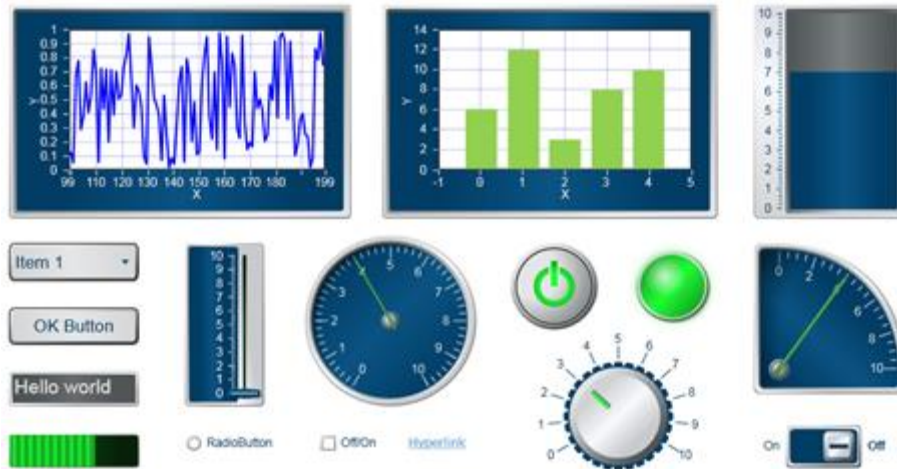


Figura 2.4 Gráficos de visualización en LabVIEW.

Las principales características de los VIs se pueden describir como:

Los VIs contienen una interface interactiva de usuario, la cual se llama panel frontal, ya que simula el panel de un instrumento físico. Se pueden introducir datos usando el teclado o el ratón y tener una visualización de los resultados en la pantalla del computador. El Panel Frontal es la interface hombre-máquina de un VI.

Los VIs reciben instrucciones de un diagrama de bloques construido en lenguaje G, el cual suministra una solución gráfica a un problema de programación. El diagrama de bloques es el código fuente de un VI. Usan una estructura hereditaria y modular que permite realizar programas por niveles o hacer programas con otros programas o subprogramas. Un VI contenido en otro VI es denominado subVI. Todo VI se puede convertir en subVI sin ningún tipo de cambio en su estructura. Con estas características LabVIEW permite dividir un programa en una serie de tareas las cuales son divisibles nuevamente hasta que una aplicación complicada se convierte en una serie de sub-tareas simples. Es por ello que se le considera programación modular.

Por muchos años, LabVIEW ha sido conocido como una herramienta de desarrollo empleada para interactuar entre sistemas de adquisición de datos y control de instrumentos de manera fácil y rápida. Esta plataforma se emplea para el desarrollo de pruebas, medición, control de procesos, automatización, monitoreo y simulación. Las principales ventajas son: su conectividad con instrumentos, capacidad de adquisición de datos, flujo de datos natural basado en una interface gráfica de programación, escalabilidad, además del complemento de funciones pre-configuradas.

2.2.1 Introducción a LabVIEW

Para poder extraer información valiosa de los datos adquiridos, tomar decisiones del proceso y obtener resultados, los datos necesitan ser manipulados y analizados. Desafortunadamente, combinar el análisis con la adquisición de datos y la presentación de los mismos no es siempre un proceso transparente. Mientras hay varias herramientas que de forma independiente cumplen uno de los requerimientos, LabVIEW combina la programación gráfica y el hardware de adquisición de datos. La combinación de la adquisición de datos, análisis de datos y la presentación de los resultados es lo que realmente maximiza el poder de la instrumentación virtual. Un instrumento virtual consiste en una computadora estándar industrial o estación de trabajo equipada con un software de aplicación, hardware modular tal como tarjetas insertables y controladores de software que, en conjunto, realizan las funciones de un instrumento tradicional.

Los usuarios incorporan análisis en sus aplicaciones de diferentes formas. Hay ciertas consideraciones que ayudan a determinar la forma en cómo el análisis debe ser realizado.

2.2.2 Análisis en línea vs fuera de línea

El análisis en línea implica que los datos son analizados dentro de la misma aplicación en donde se está adquiriendo. Este generalmente es el caso cuando se tiene que trabajar con aplicaciones en donde se toman decisiones durante el proceso y los resultados tienen consecuencias directas en el proceso, generalmente a través del cambio de parámetros o ejecutando acciones. Es importante considerar la cantidad de datos adquiridos y las rutinas particulares de análisis que son hechas con los datos. Se debe buscar un balance adecuado ya que los datos fácilmente pueden demandar muchos recursos computacionales y tener un efecto negativo en el rendimiento de la aplicación.

Otros ejemplos para análisis en línea son aplicaciones en donde los parámetros de mediciones necesitan ser adaptados a las características de la señal medida. Midiendo y analizando ciertos aspectos de las señales, las aplicaciones se pueden adaptar a las circunstancias y permitir la correcta ejecución de los parámetros.

En algunos casos se requieren aplicaciones con un cierto grado de inteligencia la habilidad de tomar decisiones basadas en varias condiciones que son requeridas, la cual sólo puede ser proporcionada agregando algoritmos de análisis a la aplicación.

Las decisiones basadas en adquirir datos no siempre son tomadas de una manera automatizada. Frecuentemente aquellos involucrados en el proceso necesitan monitorear la ejecución y determinar si está funcionando como se espera o si una o más variables necesitan ajustarse. Aunque no es común para los usuarios registrar los datos, extraerlos de un archivo o una base de datos y después analizarlos fuera de línea para modificar el proceso, muchas veces los cambios necesitan darse mientras la aplicación está corriendo. En estos casos, la

aplicación necesita manejar los datos provenientes del proceso y después manipularlos, simplificarlos, formatearlos y presentarlos de forma que sea más útil para el usuario final.

LabVIEW implementa análisis y rutinas matemáticas que trabajan en conjunto de forma nativa con funciones de adquisición de datos y capacidades de despliegue de información, de forma que pueden ser construidos dentro de cualquier aplicación. Adicionalmente, ofrece rutinas de análisis para ejecuciones de punto por punto; éstas están diseñadas específicamente para cumplir las necesidades de análisis en línea en aplicaciones de tiempo real. Los usuarios deben considerar ciertos aspectos cuando decidan si las rutinas de punto por punto son apropiadas.

Al análisis de punto por punto es esencial cuando se tienen que manejar procesos de control en donde la alta velocidad, determinismo y adquisición de datos punto por punto está presente. En cualquier momento los recursos están dedicados a la adquisición de datos en tiempo real, el análisis se vuelve una necesidad en la medida que los rangos de adquisición y los ciclos de control son incrementados por órdenes de magnitud. El acercamiento al punto por punto simplifica el diseño, la implementación y los procesos de pruebas porque el flujo de la aplicación se encuentra muy cerca de igualar el flujo natural de los procesos del mundo real que la aplicación está monitoreando y controlando. En la figura 2.5 se muestra una comparativa entre el análisis basado en arreglos y el análisis punto por punto, se observa que el resultado de la señal procesada es la misma en ambos casos, siendo la diferencia principal que el primero exige mayor carga computacional al procesar más datos de manera simultánea que el análisis punto por punto.

La adquisición de datos en tiempo real y su respectivo análisis continúan demandando aplicaciones más dinámicas y estables. El análisis punto por punto es dinámico y estable porque se apega directamente al proceso de adquisición y análisis. Con un análisis estable y dinámico de punto por punto el proceso de adquisición y análisis asemeja a sistemas de control basados en chips FPGA (*Field Programmable Gate Array*), chips DSP, controladores embebidos, CPU's dedicadas y ASIC's.

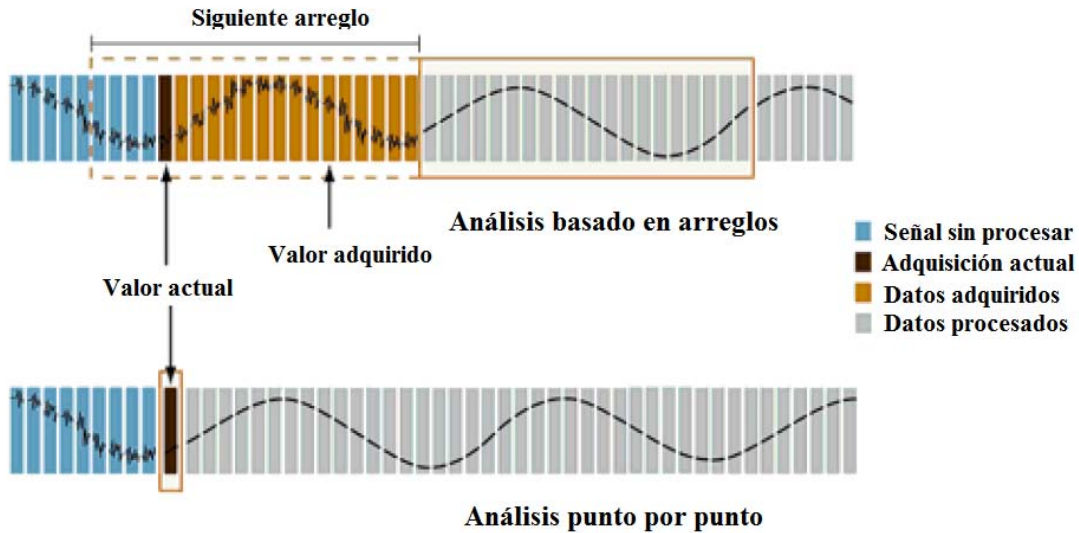


Figura 2.5 Análisis punto por punto contra análisis basado en arreglos de datos.

Agregando estos algoritmos y rutinas dentro de una aplicación, los usuarios eliminan el trabajo de conjetura y crea procesos inteligentes que pueden analizar los resultados mientras éste se ejecuta, mejorando así la eficiencia y correlacionando interactivamente las variables de entrada con el desempeño del sistema.

Existen aplicaciones que no requieren que los resultados sean obtenidos en modo de tiempo real para tomar decisiones en el proceso. El principal objetivo de este tipo de aplicaciones es identificar la causa y efecto de las variables que afectan el proceso mediante la correlación de varios paquetes de datos. Estas aplicaciones generalmente requieren de importar datos de archivos binarios personalizados a archivos ASCII y bases de datos comerciales siendo algunas de las mayormente empleadas Oracle, Access o QL/ODBC.

Una vez que los datos son importados a LabVIEW, los usuarios realizan muchas o miles de rutinas de análisis disponibles, manipulan los datos y los arreglan en diferentes formatos para propósitos de reportes. LabVIEW provee funciones para acceder a cualquier formato de archivo y bases de datos, de manera transparente se conecta a través de una interfaz nativa con herramientas de reporte como DIAdem y el toolkit de Generación de Reporte para Microsoft Office, XLM, presentaciones de datos en web y ActiveX. Lo que permite la flexibilidad entre diferentes esquemas de análisis y manejo de la información.

2.2.3 Reducción de información

LabVIEW permite desarrollar sistemas inteligentes dentro de las aplicaciones para realizar análisis en línea y presentar los resultados mientras la aplicación principal

se encuentra ejecutándose. Adicionalmente, adquirir datos y procesarlos para el propósito de la visualización en línea no es suficiente. Generalmente se guardan cientos o miles de megabytes de datos en discos duros y bases de datos. Después de correr la aplicación una o miles de veces los datos se extraen en cualquier punto para tomar decisiones, comparar resultados y hacer los cambios necesarios al proceso hasta que el resultado deseado sea conseguido. Es relativamente fácil adquirir grandes volúmenes de datos tan rápido que se vuelven inmanejables. De hecho, un sistema de adquisición de datos puede tomar sólo unos milisegundos para registrar miles de valores. No es una tarea trivial que todos estos datos se puedan comprimir sin perder la esencia de la información.

Siempre es deseable que los usuarios presenten reportes, gráficas y, finalmente, corroboren cualquier logro y conclusiones con datos empíricos. Construyendo este tipo de aplicaciones al programa se le confiere cierto grado de interactividad dentro de sus aplicaciones. Para que esto sea eficiente, el programador debe tener bastante conocimiento acerca de la información y tipos de análisis en los cuales esté interesado el usuario final.

Mediante las herramientas de LabVIEW se pueden reducir los datos de manera significativa y formatearlos antes ser almacenados en el disco duro, haciendo más fácil el manejo de la información cuando los datos almacenados son extraídos para un análisis futuro. Además, provee de cientos de funciones para generar reportes basados en los resultados y la información obtenida de los datos adquiridos.

2.2.4 Categorías de análisis

LabVIEW ofrece cientos de funciones de análisis incorporadas que cubren diferentes áreas y métodos de extraer información de datos previamente adquiridos. Estas funciones permiten ser modificadas, personalizadas y reutilizadas para cumplir con una necesidad en particular.

Las categorías de análisis que tiene LabVIEW son las siguientes:

- Medición.
- Procesamiento de señales.
- Algoritmos matemáticos.
- Procesamiento de imágenes.
- Sistemas de control.
- Simulación.

2.2.5 Herramientas de análisis

Las herramientas incorporan un set de librerías y funciones diseñadas específicamente para el análisis con las cuales se pueden cubrir un amplio rango de aplicaciones. Las funciones avanzadas de análisis permiten medir características de señales tales como distorsiones totales de armónicas, respuesta de impulso, respuesta de frecuencia y densidad de espectro de frecuencia. Adicional, se pueden incorporar análisis matemático o numérico en sus aplicaciones para propósitos tales como resolver ecuaciones diferenciales, optimización, búsqueda de raíces y otros problemas matemáticos.

Aunque los usuarios pueden desarrollar estas funciones por ellos mismos, las funciones incorporadas buscan que se trabaje en el problema en vez de trabajar en el desarrollo de herramientas. Emplear estas funciones elimina la necesidad de entender la base teórica para construir estos algoritmos. También cuenta con herramientas adicionales y módulos para reducir el tiempo de desarrollo para necesidades específicas de aplicaciones especializadas. Incorporando componentes de los *Toolset* dentro de aplicaciones personalizadas, se elimina la necesidad de experiencia específica comúnmente asociada con el desarrollo de aplicaciones más verticales. Algunas herramientas de análisis comúnmente empleadas son:

- Procesamiento avanzado de señales.
- Análisis de empalme tiempo-frecuencia.
- *Wavelets*.
- Modelos basados en análisis espectral.
- Análisis de sonido y vibración.
- Análisis de orden.

Con el poder y flexibilidad de las computadoras de hoy en día, se realizan de manera más eficientes las mediciones, control, monitoreo, diagnóstico, automatización, pruebas y caracterización de cualquier proceso. De cualquier forma, esto no sería posible sin la habilidad de observar los datos para extraer información útil de ellos.

3 Metodología para generar el protocolo de actuación

La siguiente metodología se establece con el fin de generar protocolos de actuación a corto, mediano y largo plazo en los puentes del Centro de Monitoreo de Puentes y Estructuras Inteligentes (CMPEI) del Instituto Mexicano del Transporte. Dicha metodología consta de siete etapas que se plasma de manera general, por lo cual puede ser empleada como lineamientos para establecer protocolos de actuación en cualquier estructura monitoreada en tiempo real.

En la figura 3.1 se pueden observar las etapas que deben ser desarrolladas para la aplicación de protocolos de actuación en el monitoreo inteligente de estructuras. Las primeras tres etapas contemplan el diseño de la estrategia, lo cual las convierte en actividades de tipo conceptual. Las etapas restantes se enfocan a la implementación y validación de la estrategia con relación en las etapas de diseño.

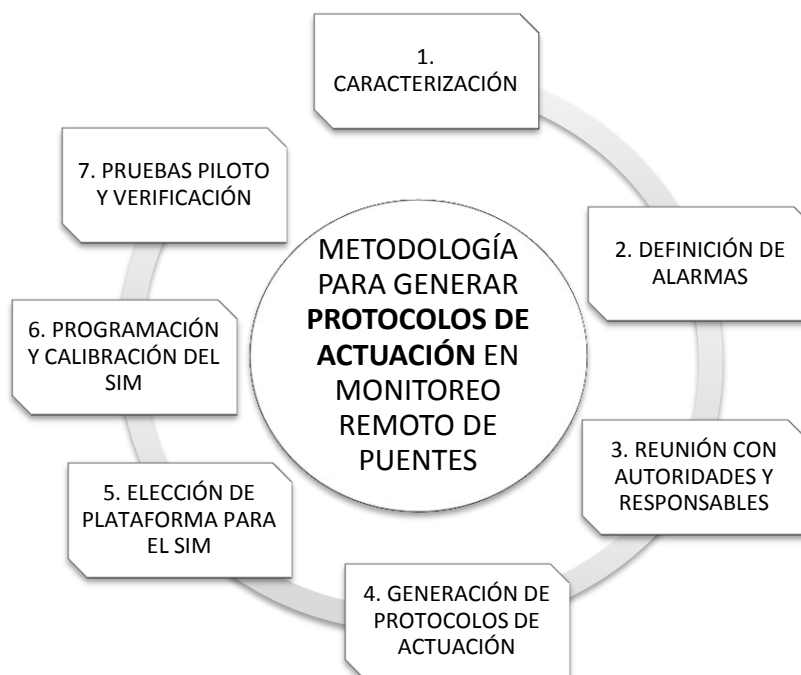


Figura 3.1 Etapas de la metodología para generar protocolos de actuación en monitoreo remoto de puentes.

A continuación, se describen de manera explícita cada una de las etapas de la metodología.

3.1 Caracterización

El primer paso en el diseño de cualquier aplicación de monitoreo de estructuras es la caracterización. Éste se divide en dos procesos importantes: la caracterización de la estructura y la caracterización del monitoreo. Ésta persigue tanto la conceptualización y la comprensión de la estructura, así como los objetivos de la aplicación del monitoreo.

3.1.1 Caracterización de la estructura

Hay varias tareas que resultan necesarias con el fin de caracterizar adecuadamente la estructura. Entre ellas se pueden incluir:

- Revisión exhaustiva de toda la información relevante de diseño y planos estructurales, documentación relevante generada durante la operación de la estructura, tal como mantenimientos realizados, reparaciones, cambios en configuraciones o materiales; levantamientos topográficos, información de cargas vehiculares etc., lo anterior para conceptualizar los sistemas estructurales existentes. La información histórica para estructuras actuales puede incluir los resultados de las inspecciones pasadas y los estudios, pruebas de carga o investigaciones que puedan haber sido realizadas.
- Reconstrucción virtual de componentes importantes o detalles de la estructura con modelos CAD. Las visitas en campo pueden ser necesarias para recopilar información adicional e identificar posibles obstáculos físicos u otras limitaciones. En caso de que exista documentación incompleta, técnicas como la fotogrametría pueden ser útiles para llenar espacios vacíos. Las pruebas preliminares y a pequeñas escalas también se pueden llevar a cabo en las estructuras existentes o mediante modelos físicos de estructuras o componentes críticos para obtener una perspectiva adicional.
- Desarrollo de modelos de elementos finitos (MEF) para análisis o simulación de efectos de carga así como respuestas dinámicas. 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.
- Ubicación geográfica de la estructura. Las características ambientales cambian de una región del país a otra, esto ocasiona que el enfoque del monitoreo tenga algunas variantes dependiendo de la zona geográfica en donde esté la estructura. La temperatura, la cantidad y velocidad del viento así como los sismos, producen cargas en la estructura que la hacen más vulnerable a ciertos tipos de fallas.

3.1.2 Caracterización de la aplicación del monitoreo

Consiste en establecer tanto el tipo, nivel y duración del monitoreo como la instrumentación necesaria para cumplir con los objetivos inicialmente definidos. Estas características dependerán del escenario de aplicación en particular y, a su vez, tendrán una gran influencia en los tipos de equipos a emplear y de las estrategias necesarias para gestionar la información obtenida durante el monitoreo.

El tipo de monitoreo requerido podría ser desde una sencilla prueba controlada, el seguimiento a largo plazo de muchos sensores, o el seguimiento a largo plazo de muchos sensores con pruebas controladas realizadas a intervalos periódicos durante la duración del proyecto.

También es importante establecer si las pruebas o monitoreo implicarán zonas específicas en una estructura o si serán distribuidos espacialmente sobre toda la estructura. Esta es una consideración particularmente importante para la mayoría de los puentes de gran tamaño, ya que las grandes distancias típicamente imponen requisitos adicionales sobre los diversos componentes del sistema de monitoreo remoto.

Por último, la implementación del monitoreo puede introducir consideraciones estrictas relacionadas con la coordinación de las actividades de instrumentación y la protección de los diversos componentes del sistema de monitoreo. Para ello, es importante identificar los fenómenos a medir, la posterior selección de tipos de sensores y sistema de adquisición de datos, características de las mediciones y, por último, la respectiva calibración del sistema de medición, de esta manera se garantiza que las mediciones serán indicativas del comportamiento real de la estructura.

I Identificación de los fenómenos a medir

Este paso típicamente implica las siguientes actividades:

- Identificar los efectos internos y externos de carga, sus respectivas respuestas, criterios de servicio, actividades de fabricación o construcción, parámetros ambientales, características de funcionamiento y los parámetros de seguridad que deben ser monitoreados para cumplir con los objetivos del proyecto.
- Identificar y caracterizar individualmente parámetros mecánicos, químicos, eléctricos y ópticos que identificarán los fenómenos de interés. Estos parámetros pueden incluir fuerzas, esfuerzos, desplazamientos, rotaciones, vibraciones y deformaciones, parámetros ambientales como la temperatura, humedad, precipitación, velocidad y dirección del viento, las cantidades de tráfico, etc. Algunos parámetros pueden ser de naturaleza estática; mientras que otros pueden ser dinámicos.

- Determinar los intervalos y exactitud de la medición para cada parámetro de interés. Los modelos analíticos creados durante la etapa de caracterización pueden ser utilizados para obtener una estimación de los intervalos de medición para muchos de los parámetros. Otros valores pueden ser obtenidos de proyectos realizados para estructuras similares. Si las estimaciones realistas para los rangos de medición requeridos no pueden determinarse a partir de trabajos previos, podrá ser necesario realizar pruebas a pequeña escala para obtener los valores requeridos. También es importante tener en cuenta las posibles interacciones entre los diversos parámetros de medición y el entorno ambiental al establecer los rangos estimados. La exactitud requerida puede ser diferente para cada parámetro de medición y dependerá de la finalidad de los datos.
- Ubicar los lugares físicos donde se medirán los parámetros. Las zonas exactas deben ser identificadas y registradas para los diferentes sensores que se instalarán.

II Selección de sensores y sistema de adquisición de datos

Los sensores y componentes del sistema de adquisición de datos se seleccionan de un grupo de proveedores disponibles en el mercado. Éstos se eligen en función de sus características físicas, eléctricas y termodinámicas.

Un conjunto detallado de las especificaciones de instalación debe ser preparado para cada tipo de sensor y de componentes del sistema de adquisición de datos que se utilizará. Estas especificaciones deben detallar los métodos y técnicas que se utilizarán para la instalación en diagramas claramente identificados, así como la configuración de los sensores y componentes de adquisición de datos. Se debe incluir un procedimiento para verificar que el desempeño de cada componente sea adecuado.

III Selección de equipos complementarios

Es deseable que un sistema de monitoreo no sólo obtenga información de sensores instalados en el puente, algunos parámetros también importantes a monitorear son los ambientales como: temperatura, velocidad y dirección del viento, radiación solar y precipitación pluvial; una estación climatológica proporcionará esta información que, en el futuro, se requerirá para realizar análisis de correlación y así determinar la influencia de estos parámetros en el comportamiento de estructura.

El empleo de cámaras de video es indispensable en una aplicación de monitoreo estructural remoto. Cuando el usuario del sistema de monitoreo puede visualizar lo que realmente está ocurriendo en la estructura ayuda a tomar mejores decisiones y, hablando de un Sistema Inteligente de Monitoreo, permitirá a éste retroalimentar la información para asociar patrones de comportamiento en la estructura

relacionados a flujo y carga vehicular, eventos extraordinarios como accidentes vehiculares, sismos, huracanes, etc.

IV Calibración del sistema de medición

La calibración del sistema de medición es importante porque los sensores y componentes de adquisición de datos utilizados para las pruebas en puentes y aplicaciones de monitoreo típicamente requieren algún grado de personalización, debido a que las características de funcionamiento indicadas por muchos fabricantes de sensores y de sistemas de adquisición de datos a veces son engañosas o imprecisas. Por lo tanto, la calibración proporciona un medio para verificar el desempeño de los componentes del sistema de medición de manera individual y como un sistema integrado en condiciones controladas antes de que sean instalados en una estructura. La calibración del sistema de medición puede revelar que ciertas características del sensor o del sistema de adquisición de datos no son adecuados para la aplicación requerida lo que ocasionará que alguna otra alternativa sea evaluada. Es importante señalar que este tipo de calibración se realiza con fines de validación y no es una sustitución para las calibraciones periódicas de laboratorio con trazabilidad al Centro Nacional de Metrología (CENAM).

Los sistemas de calibración de medición desarrollados para fines de verificación suelen incorporar una serie de plantillas de calibración y sistemas mecánicos transparentes que permitan a los sensores ser sometidos a parámetros controlados como cargas, desplazamientos, inclinaciones y aceleraciones.

3.2 Definición de alarmas

Después de haber obtenido las características de la estructura y el sistema de monitoreo conviene evaluar, por cada parámetro de medición, los límites de operación de los sensores que sean indicativos de un síntoma anormal de operación, deterioro o daño que comprometa el servicio, la seguridad o la confiabilidad de la estructura.

Un método simple y eficaz para definir los límites de las alarmas es la comparación de los datos obtenidos del monitoreo con los valores del umbral elegidos de manera preliminar. Esos valores se pueden obtener de los códigos y normas, así como determinarlos a través de investigaciones y de la propia experiencia.

Varios de los umbrales definidos para la ejecución del proceso constructivo o durante el uso de la estructura deben mantenerse, éstos se especifican en los códigos de diseño para dicha estructura. Si los valores de evaluación son medibles directamente, pueden ser utilizados para la evaluación de los resultados del monitoreo. En particular, se aplica para los límites de deformación en el estado límite de servicio. Otros valores para la prestación de servicio y seguridad contra la fatiga son indicados en los códigos de diseño.

Si los valores límites no se definen en los códigos o normativas, que puedan determinarse en análisis preliminares. Se recomienda emplear análisis sobre modelos estructurales, análisis estadísticos o ensayos de materiales. Definir los valores límites requiere un conocimiento fundamentado en las relaciones estructurales.

Como los valores de las mediciones para la evaluación serán diferentes para diversas situaciones, éstos deben ser divididos en categorías. En general la base de la evaluación de las alarmas es comprobar si los valores monitoreados en servicio de la estructura exceden los valores de dichas categorías. De esta manera se emplean los datos del monitoreo como indicativo de cuánto ha mejorado, si se ha realizado alguna rehabilitación, o cuánto se ha deteriorado la estructura.

En algunos casos es recomendable llevar a cabo la evaluación de una combinación de categorías, ya que realizar la evaluación de manera global ayudará a que interpretar la información se convierta en una actividad menos laboriosa. Por lo anterior, se proponen cinco categorías de los límites a consideración para el monitoreo continuo de los parámetros estructurales. Estas categorías se describen de menor a mayor grado de daño en los parámetros estructurales.

3.2.1 Límites normales de operación

Durante el periodo de servicio de la estructura, sus parámetros suelen variar tanto por efectos térmicos o por las mismas cargas dinámicas a las que está sometida, por lo cual es recomendable cuantificar los valores por cada efecto. En esta categoría se obtienen los límites tomando en consideración valores estadísticos del parámetro estructural a partir de los datos registrados por el monitoreo continuo bajo condiciones de operación normal de la estructura.

A continuación, se describen los pasos de la estrategia para definición de límites basada en ajustes de distribuciones estadísticas por cada sensor de interés.

1. Extraer los valores crudos registrados por el sensor.
2. Calcular el valor de la media que represente n minutos de adquisición.
3. Unir los valores de las medias obtenidas previamente en un vector que constituya n días de adquisición.
4. Realizar ajustes de distribución estadística de las medias obtenidas con anterioridad, si es posible considerar el menor error chi-cuadrado como parámetro para elegir el mejor ajuste.
5. Obtener un único tipo de distribución estadística que represente el comportamiento de cada sensor.

6. Calcular la media anual del conjunto de medias, obtenidas a partir del ajuste de distribución estadístico.
7. Definir la cantidad y rangos de los límites a partir de n desviaciones estándar con respecto a la media anual.

3.2.2 Límites de confort

En ingeniería las magnitudes de las oscilaciones o vibraciones de las estructuras (frecuencias, aceleraciones, velocidades y desplazamiento) medidas o calculadas deben evaluarse en función de si los efectos de estas vibraciones son o no tolerables. Esta categoría se enfoca en los límites de vibraciones máximos en los cuales los usuarios se sienten inseguros para emplear la estructura, aunque estos valores no pongan en riesgo los parámetros estructurales críticos sí se deben tomar en cuenta ya que el ser humano puede percibir esas vibraciones convirtiéndose en una señal de inseguridad al emplear dicha estructura.

3.2.3 Límites obtenidos durante el proceso constructivo

La estructura en fase de construcción eventualmente se somete a valores de esfuerzos, deformaciones, vibraciones e inclinaciones de gran amplitud generadas por el mismo proceso constructivo, esto al trasladar dichos elementos de una zona a otra o simplemente en el proceso de montaje o apuntalamiento, se espera que durante el periodo de servicio de la estructura estos valores jamás sean obtenidos. Es deseable que estos valores sean registrados para ser empleados durante el monitoreo continuo de la estructura en su etapa de servicio.

3.2.4 Límites de diseño

Se basa en los valores máximos en los parámetros estructurales proyectados por el diseñador, obtenidos de códigos y normas de diseño específicas para la estructura. En algunas ocasiones se obtienen a través de modelos de elementos finitos.

3.2.5 Límite de resistencia de materiales

Representa al mayor grado de daño que pueden sufrir los elementos estructurales críticos, aquellos que sean más susceptibles a falla. Se basa en las capacidades físicas de los materiales empleados en la estructura, en otras palabras, a la resistencia de los materiales, generalmente se expresa como un porcentaje del límite de fluencia o resistencia última de los elementos estructurales críticos.

3.2.6 Límites basados en Simulación Montecarlo

Se han establecido estrategias para determinar los límites de las alarmas cuando no se tiene información dada por alguna instrumentación en la estructura. Esta

aproximación se basa únicamente en datos estadísticos de cargas dinámicas a la que la estructura está expuesta. A continuación, se mencionan las etapas de la metodología propuesta por el IMT para el establecimiento de alarmas basadas en Simulación Monte Carlo para el caso de puentes.

1. Generar y calibrar un Modelo de Elementos Finitos (MEF).
2. Analizar el flujo vehicular sobre el puente.
3. Determinar y generar curvas estadísticas de cargas vehiculares y por viento.
4. Desarrollar algoritmo de Simulación Monte Carlo.
5. Obtención de límites de alarmas basados en datos estadísticos.

3.3 Reuniones con autoridades y responsables

Inicialmente se realizan reuniones con los posibles interesados para establecer las perspectivas, incertidumbres y expectativas del proyecto. Generalmente dentro de los interesados se incluye al propietario, diseñador, encargado del mantenimiento, contratistas, pero también puede incluir las instituciones gubernamentales, la comunidad científica involucrada con la infraestructura civil y los usuarios finales. Tanto la justificación como los resultados esperados del programa de monitoreo deben estar claramente identificados y analizados. Ya sea que el monitoreo busque dar respuestas a preguntas o abordar incertidumbres relacionadas con los procesos constructivos, comportamiento o desempeño estructural; complementar los resultados de las inspecciones visuales, evaluar la eficacia de mantenimiento o actividades de modificación, proporcionar una evaluación objetiva de la situación presente o futura, detectar daños o deterioro para una óptima planificación del mantenimiento, evaluar los efectos de los eventos peligrosos o accidentes, dar seguimiento a los parámetros de operación y proporcionar estadísticas, o abordar problemas de seguridad vial.

Posteriormente, las reuniones deben enfocarse a definir tanto la relevancia como las acciones pertinentes a realizar por cada una de las personas involucradas en la conservación de la infraestructura y seguridad de los usuarios, en otras palabras, definir claramente los protocolos de actuación.

Antes de comenzar a dedicarle esfuerzo y tiempo a la siguiente etapa, es imperativo realizar los siguientes puntos:

- Una matriz de correlación para definir las responsabilidades y procedimientos de actuación, en la cual se especifique la intervención de cada participante.

- Reuniones de trabajo con el objetivo de definir procedimientos ante comportamientos anómalos en la estructura.
- Un directorio con los nombres de los funcionarios a los que se les comunicará la información dependiendo de los diferentes niveles de actuación.

Es deseable que las reuniones se continúen dando en las etapas posteriores de la metodología ya que éstas permitirán hacer eficaz cada uno de los protocolos de actuación para evitar realizar acciones innecesarias o que entorpezcan algunas de las actividades cuando se presente alguna condición anormal en la estructura.

3.4 Generación de protocolos de actuación

En esta etapa se plasma y desarrolla la normativa que establece cómo se debe actuar ante ciertos eventos o fenómenos que se presenten en la estructura y que, por supuesto, impacten de manera negativa al servicio, la seguridad o la confiabilidad de la misma. Esta normativa será la pauta a seguir en los criterios para la toma de decisiones de manera automatizada por el Sistema Inteligente de Monitoreo.

Primero se deben definir los niveles de actuación usando de referencia el grado de daño o afectación que pueda llegar a tener la estructura. A continuación, se realiza la conceptualización de los diferentes protocolos de actuación para cada una de las autoridades involucradas con base en los diferentes niveles de actuación, definidos de manera previa. Por último, se deben plasmar en diagramas de flujo los protocolos de actuación en el que se visualicen las actividades a ejecutarse ante diferentes eventos que ocurran en el puente.

Es importante considerar el desarrollo de criterios para la posterior toma de decisiones. Un Sistema Inteligente de Monitoreo en general sólo debe mostrar datos que se ha sintetizado en una forma significativa y puedan ser interpretados con facilidad. Además de mostrar los resultados de las mediciones, el sistema debe ser capaz de proporcionar alguna indicación de su propia condición. Indicadores de estado o señales audibles pueden ser utilizados en la mayoría de los casos para permitir al usuario evaluar rápidamente el estado del funcionamiento del sistema. Los análisis adicionales aumentarán la importancia y eficiencia del sistema. Los criterios que se utilizan para determinar qué datos se mostrarán deben desarrollarse con una aportación significativa del usuario final, y pueden requerir varias iteraciones antes de finalizar un esquema óptimo para la presentación de la información.

Los criterios para las tomas decisiones también deben desarrollarse de manera que los datos de las mediciones tengan un propósito significativo. En una aplicación de monitoreo a largo plazo de la salud estructural, el sistema debe ser capaz de interpretar los datos de las mediciones, comparar el resultado con un

conjunto predeterminado de criterios y ejecutar una decisión de manera automatizada.

Dentro de los protocolos de actuación se debe considerar enviar los datos del monitoreo antes, durante y después de ocurrir algún evento extraordinario para que la información sea visualizada e interpretada por un experto, evitando alguna incorrecta interpretación de la información por parte del sistema. Como herramienta de ayuda visual a la interpretación de los datos del monitoreo se debe emplear una cámara de video tipo PTZ, la cual permita visualización en tiempo real al ocurrir un evento extraordinario, al igual que los datos del monitoreo, es deseable que el video sea enviado para su posterior revisión.

El ejemplo más simple es considerar un sistema de monitoreo que emita una alerta cuando los datos de medición indican que algún comportamiento ha superado un valor particular. Enseguida se almacenan y envían tanto los datos como video antes, durante y después a la alerta. Esta información se puede transmitir al usuario, o interesados en la salud de la estructura, por medio de correo electrónico, página web, aplicaciones de telefonía móvil o algunas otras opciones. Los criterios de decisión se deben probar a fondo antes de su aplicación y deben ser lo suficientemente robustos para evitar la aparición de falsas alarmas.

3.5 Elección de plataforma para el Sistema Inteligente de Monitoreo (SIM)

Cuando se trata de elegir un lenguaje para utilizar en un proyecto en particular, los principales factores en la decisión se reducirán a los requisitos técnicos del proyecto y a las habilidades lingüísticas del desarrollador.

Uno de los factores más importantes para determinar el lenguaje de programación en el que se desarrollará un proyecto es la plataforma de destino de la aplicación. Sin embargo, si se desea realizar una aplicación que sea ejecutada en múltiples plataformas, no tiene sentido programar el proyecto en un lenguaje diseñado para compilar los programas para un único sistema operativo.

En la actualidad resulta eficiente utilizar herramientas existentes para realizar las funciones básicas en nuevos proyectos, en lugar de gastar tiempo creando una nueva herramienta a través de la programación. Ejemplos de estas herramientas que los programadores pueden utilizar, en lugar de reinventar, son bibliotecas para generar interfaces gráficas de usuario o establecer conexiones de comunicación. Si una empresa necesita utilizar estas bibliotecas para sus proyectos, entonces tendrán que seleccionar un lenguaje en el que esta biblioteca cuenta con una interfaz. Por ejemplo, si un equipo de desarrollo quisiera usar NET framework de Microsoft, tendrían que utilizar uno de los lenguajes de programación como Visual Studio.

Los lenguajes de programación pueden dividirse en lenguajes de "bajo" nivel, como C y C++, o lenguajes de nivel "alto", como Python y LabVIEW. Los primeros

están diseñados para darle al programador más acceso al hardware de un dispositivo determinado. Los segundos, por otra parte, administran la mayor parte de este acceso para el programador. Si se requiere desarrollar una aplicación cuya finalidad no es manipular los componentes individuales del hardware, como es el caso del monitoreo estructural, entonces utilizar un lenguaje de programación de alto nivel les hace la vida más fácil a los programadores al administrar el uso de la memoria de manera automática.

En el caso de elegir una plataforma para el desarrollo de una aplicación que tiene como objetivo monitorear de manera automática diversos parámetros de medición, se recomienda considerar las siguientes características inherentes a cada plataforma de desarrollo:

- Consumo de memoria RAM.
- Facilidad de manejo y acceso al disco duro.
- Consumo de procesador.
- Compatibilidad y generación de gráficos (Visualización).
- Compatibilidad y generación de reportes (Documentación).
- Comunicación con hardware.
- Costo de licencia del software de desarrollo.
- Tiempo de desarrollo de la aplicación.

Es conveniente tomar en cuenta algunas de las características mencionadas con anterioridad para generar un listado de las mismas y con ello crear una tabla comparativa de, por lo menos, tres diferentes programas compiladores, usando como criterios de aceptación dichas características. Se puede asignar un valor a cada una de las características, dependiendo de la relevancia que tenga para el desarrollador y, con ello, finalmente elegir la plataforma de desarrollo que obtenga mayor puntuación. Aunque ante la ausencia de otros factores que determinen el lenguaje en que se debe desarrollar la aplicación, el conjunto de habilidades del desarrollador es fundamental para esta decisión.

3.6 Programación y calibración del SIM

Esta etapa contempla las actividades y características a considerar en el desarrollo e implementación de un Sistema Inteligente de Monitoreo. En específico antes de comenzar a realizar las actividades de programación.

3.6.1 Aseguramiento de la calidad de la información

El desarrollo de métodos apropiados para el aseguramiento de la calidad de los datos, procesamiento y almacenamiento representa el mayor desafío relacionado con las tecnologías de la información para aplicaciones de monitoreo a largo plazo de la salud estructural.

Hay muchas posibles fuentes de error e incertidumbre en el campo que pueden afectar a la fiabilidad de las mediciones, incluso cuando se ha hecho un esfuerzo importante para seleccionar los sensores y componentes de adquisición de datos más confiables. Por lo tanto, a menudo es deseable adoptar un enfoque dedicado a garantizar la calidad de la información, en donde los métodos desarrollados se implementan en múltiples niveles, los métodos de control de calidad de datos que se pueden considerar pueden incluir una calibración inicial completa de los sensores y hardware de adquisición de datos, seguido de re-calibración periódica, verificando y garantizando la calidad de la instrumentación inicial, además de implementar sistemas redundantes. Las verificaciones periódicas de datos se pueden programar en el software de adquisición de datos para validar de forma automática el tiempo y rangos de medición, de esta manera se detectan lecturas falsas de las señales. Dentro de los controles de calidad que se pueden implementar para la visualización de los datos, en tiempo real, se incluyen: verificar visualmente que un sensor está funcionando y que las señales de los sensores sean coherentes y lógicas. Una vez que las señales de los sensores están en la computadora, un régimen de procesamiento de señal digital se puede aplicar a los datos de medición para eliminar información no deseada o redundante. Los datos procesados pueden ser archivados en una base de datos para facilitar el uso de métodos de correlación multivariante, además de algoritmos de lógica de alto nivel para múltiples conjuntos de datos.

Los métodos requeridos para una aplicación de monitoreo dado dependerá de la cantidad, la complejidad de los datos de medición y la confiabilidad real del conjunto de sensores y sistema de adquisición de datos. Las características de la adquisición de datos del sistema de monitoreo a menudo introducirán ciertas particularidades en los datos. Éstas pueden afectar aún más la disponibilidad de los datos recolectados para su posterior análisis. Las características temporales y espaciales de los datos, la secuencia de adquisición de datos, retrasos debido a las características intrínsecas del sistema, metodología de asignación de fecha y hora y la sincronización de los datos, deben ser claramente entendidas y tomadas en cuenta.

3.6.2 Velocidad de muestreo de datos

El control de la velocidad de adquisición de datos se basa en las características requeridas de los fenómenos que se capturen y las limitaciones del sistema de medición. En general, un sistema de monitoreo se utiliza para capturar efectos de baja frecuencia (largo plazo), efectos de alta frecuencia (corto plazo), efectos ambientales y flujo de video o fotografías de incidentes.

Los componentes de control de adquisición de datos deben ser flexibles en la gestión del monitoreo continuo de los fenómenos a largo plazo a las frecuencias de adquisición deseadas, mientras que los eventos a corto plazo pueden ser monitoreados mediante un programa de búsqueda automática. El monitoreo basado en incidentes también debe ser manejado por una función del mismo sistema de adquisición de datos.

La velocidad de muestreo de datos determina la cantidad y calidad de los datos, lo que influye en la elección del tipo de análisis, almacenamiento, acceso y métodos de interpretación de la información. Se recomienda que se incorpore, a través de software, el control en la velocidad de adquisición de datos para el monitoreo a largo plazo en las estructuras de gran tamaño. Por ejemplo, cuando una o más señales necesitan ser registrados, pero este cambio advierte lentamente picos de alta frecuencia. Para poder reducir la cantidad de datos adquiridos, la aplicación tendrá que reconocer rápidamente la necesidad de un muestreo más rápido y reducirlo cuando los picos hayan pasado.

3.6.3 Recolección, reducción y almacenamiento de la información

La recolección, reducción y almacenamiento de datos son funciones importantes del sistema de adquisición. Hay tres pasos principales involucrados en el proceso de recolección de datos:

1. Búfer temporal de datos
2. Procesamiento de datos
3. Almacenamiento de datos

El proceso de reducción de datos es también dependiente de los fenómenos medidos y de la información que se va a extraer del conjunto de datos. Cuando los datos se adquirieron durante períodos de tiempo prolongados o a frecuencia alta, el tamaño de los archivos generados puede ser bastante grande. El volumen de datos es un tema particularmente importante en términos de esfuerzo requerido para la identificación y extracción de las características deseadas por el monitoreo. El almacenamiento de más datos adquiridos durante largos períodos de tiempo también puede ser problemático cuando se presentan consultas para extraer los datos en diversos intervalos de tiempo.

Las aplicaciones para reducción de datos y métodos de adelgazamiento de información o de re-muestreo ayuda a disminuir el tamaño de los datos disponibles. Sin embargo, es imperativo mantener las propiedades básicas de los datos después del proceso de reducción. Valores como máximo, mínimo, media, varianza, desviación estándar y otros parámetros estadísticos de las mediciones de los datos deben estar representados de manera fiel después de reducir la información. Este proceso para reducción de la información puede ser identificado

con base en la naturaleza de los datos adquiridos, los parámetros medidos y el método utilizado para el análisis y la interpretación de la información.

El almacenamiento permanente de los datos adquiridos es otra consideración importante. El almacenamiento y el manejo de la información sin una planificación y un diseño adecuado, puede convertirse fácilmente en un problema. Los datos adquiridos se almacenan localmente, posteriormente son transferidos a componentes de almacenamiento adecuados después de ser agrupados e identificados de manera correcta. El método más apropiado dependerá de la finalidad de los datos, las técnicas que se utilizarán para el análisis de datos, la frecuencia a la que se accederá a los datos almacenados y la duración de tiempo que se espera que los datos sirvan para algún propósito. Si los datos se deben acceder con frecuencia para determinado análisis, el mejor método puede ser la ubicación de la información en una base de datos en una computadora o en cualquier otro medio electrónico.

El almacenamiento adecuado y el desarrollo de aplicaciones de análisis requieren una clara elección del sistema de gestión de base de datos para las consideraciones de diseño. La base de datos se puede implementar sobre bases de datos basados en archivos compartidos o bases de datos cliente-servidor. En las bases de datos de archivos compartidos a menudo se almacenan y se accede en equipos locales que permiten el acceso a usuarios de manera remota. El sistema de gestión de bases de datos cliente-servidor comparte información por tener una capacidad de procesamiento en un servidor centralizado.

Un sistema de base de datos se refiere normalmente a una recopilación de software que se distribuyen y se ejecuta en un entorno distribuido. Un sistema de base de datos puede ser dividido en varios segmentos basados en sus funcionalidades. Por ejemplo, una aplicación de base de datos puede incluir tres segmentos distintos:

- Servidor de datos.
- Servidor de negociación.
- Componente de usuario.

El servidor de datos proporciona almacenamiento, gestión, seguridad y manipulación de los datos. El servidor de negociación proporciona procedimientos específicos de negociación, reglas y programación de objetos. El componente de usuario provee una interfaz gráfica intuitiva que permite al usuario conectarse a la base de datos para realizar consultas o recuperar la información deseada. Se debe considerar incluir en el componente de usuario tres interfaces: una de consulta, otra de visualización y, finalmente, una de estadística.

La recuperación de los datos almacenados ayuda a reducir los esfuerzos de análisis de la información. Independientemente del método de almacenamiento

elegido, los procedimientos de respaldo de la información deben ser implementados y ejecutados de manera puntual con el fin de no perder la valiosa información que se obtiene a través del monitoreo.

3.6.4 Visualización en tiempo real

La visualización en línea en tiempo real de los datos de medición, el estado del sistema de monitoreo y la estructura son características deseables para facilitar las tomas de decisiones. Esta capacidad permite al encargado del monitoreo, personal de mantenimiento y al personal de ingeniería observar y relacionar varias entradas y salidas que ocurren en la estructura y evaluar las condiciones del sistema de monitoreo.

Una implementación exitosa involucra un sistema en tiempo real que realice ciertas comprobaciones para asegurar la validez de los datos antes de que estos sean mostrados. Las herramientas de Control Estadístico de Procesos (SPC por sus siglas en inglés) se pueden aplicar al proceso de flujo de datos para asegurar su validez y confiabilidad a largo plazo de manera automatizada. El SPC ofrece diferentes gráficos basados en la naturaleza de los datos. Si las herramientas del Control Estadístico de Procesos, pruebas y mediciones están integradas en el sistema de monitoreo en tiempo real, permitirán proporcionar al usuario la información necesaria para detectar anomalías e identificar sus posibles causas.

3.6.5 Post-procesamiento de datos

El Post-procesamiento de datos puede tener muchos propósitos. Generalmente se emplea para eliminar tanto valores atípicos registrados durante el monitoreo como componentes de ruido en las señales, además de extraer información puntual o sintetizar datos del monitoreo para su posterior visualización.

La medición de los fenómenos físicos tales como deformación, desplazamiento, inclinación, aceleraciones, temperatura y viento, se espera que cumplan con ciertas reglas simples de sentido común. Tales restricciones pueden ejemplificarse a continuación: valores imposibles de medición, valores repetidos, cambio abrupto en las lecturas de medición e información faltante. Estas variaciones en los datos adquiridos son a menudo debido a causas fácilmente atribuibles.

Los valores falsos en la medición son aquellos datos que son físicamente imposibles de registrar por el sistema de adquisición de datos debido a las características intrínsecas de los sensores. Los valores repetidos corresponden a mediciones exactas repetidas una después de la otra. Los cambios abruptos en las mediciones comúnmente se atribuyen a señales de ruido obtenidas en el proceso de medición, los cuales por su naturaleza son aleatorias. La información faltante corresponde a la carencia de uno o más puntos de medición de datos. Estas características se obtienen mediante la realización de una serie de revisiones básicas a los datos. Dichas revisiones en los datos se realizan antes de ser almacenados y transferidos después del post-procesamiento éste se efectúa

para desarrollar la base necesaria de evaluación de los datos adquiridos durante largos períodos de tiempo.

Los filtros permiten al usuario extraer valores específicos de la medición realizada, usualmente las señales contienen otros fenómenos adicionales a la señal de interés y los filtros se emplean para extraer este tipo de información. Un uso general de filtros se encuentra en la eliminación de ruido en las señales. En realidad, las señales de medición tienen contenido de frecuencia en todo el rango del espectro. Por definición, en donde se atenúa la señal deseada o el ruido, se puede implementar un filtro para extraer únicamente las señales de interés. Por ejemplo, los equipos electrónicos a menudo inducen ruido a frecuencias próximas a 60 Hz. La implementación de un filtro con banda de rechazo alrededor de 60 Hz puede fácilmente eliminar este ruido.

Comúnmente se emplean técnicas de procesamiento para extraer la información deseada de los datos adquiridos. Éstas se usan con frecuencia para identificar varios patrones o extraer cierta información incrustada en los datos.

3.6.6 Herramientas para análisis de la información

Las herramientas para el análisis de la información deben ser cuidadosamente seleccionadas con base en la finalidad y la información que se va a extraer de los datos. El análisis en el dominio de la frecuencia o del tiempo, análisis estadístico y análisis de correlación de la información son ampliamente útiles para el estudio de los datos del monitoreo.

- a) Las transformaciones en dominio de la frecuencia permiten al usuario visualizar una señal en el dominio de la frecuencia. Una representación en el dominio de la frecuencia muestra las diferentes frecuencias que componen la señal y las contribuciones de cada frecuencia a esa señal. En el caso del análisis en el dominio del tiempo la representación muestra cómo cambia el valor del sensor o variable de interés respecto al tiempo.
- b) Un sistema de monitoreo a gran escala que se utiliza durante un tiempo muy largo generará un volumen significativo de datos. Por lo tanto, serán necesarias técnicas para representar con precisión diferentes señales con la mínima información posible. El análisis estadístico es un método de definición de parámetros para representar una muestra de señal más grande. Las herramientas de análisis estadístico también pueden ayudar en la determinación de la similitud entre dos conjuntos de datos en términos de su coeficiente de correlación. Los coeficientes de correlación comúnmente utilizados son: la covarianza, producto de Pearson y Chi-Cuadrado.
- c) Se realizan estudios de análisis de correlación en beneficio de la identificación de las posibles relaciones entre los diferentes pares de variables. El análisis de correlación es una técnica estadística y puede determinar si los pares de variables están relacionadas entre sí.

Adicionalmente, existen gran cantidad de herramientas de análisis que pueden ser empleados dependiendo de las necesidades y objetivos que el monitoreo persiga. Cabe mencionar que mientras más herramientas de análisis sean implementadas en el Sistema Inteligente de Monitoreo se incrementará la confiabilidad de éste pero con el inconveniente de disminuir el tiempo de respuesta al ser detectada alguna anomalía debido al sobre procesamiento de la información.

3.6.7 Visualización y presentación de la información

Herramientas de visualización de datos, tales como gráficos o diagramas son implementados tras la reducción de la información. Las observaciones se realizan en términos a gráficos en el dominio del tiempo o de la frecuencia, éstas son herramientas poderosas para comprender la naturaleza de los fenómenos registrados por los datos adquiridos. La visualización de los parámetros registrados conduce a una mejor selección de los métodos de análisis o la interpretación de la información. El tipo de gráficas depende del tipo de datos del sensor y del fenómeno de interés. A menudo, las representaciones simples, como gráficas de líneas, barras, dispersión o circulares y diagramas polares son muy eficaces para dar seguimiento a dicho fenómeno.

3.7 Pruebas piloto y validación del SIM

El sistema de medición completo, incluyendo todos los diversos tipos de sensores, hardware de adquisición de datos, estación climatológica, sistema de video y componentes de software deben ser evaluados para toda la gama de condiciones de operación previstas. Éstas deben incluir parámetros tales como los asociados con diversos efectos ambientales, la interrogación simultánea de diferentes tipos de sensores para una variedad de posibles rangos de medición, diferentes velocidades de muestreo, sincronización y control remoto de los múltiples componentes de adquisición de datos, características y longitudes de cables, técnicas de instalación de sensores y otras fuentes de interferencia como ruido electromagnético. Se pueden emplear cámaras ambientales con control de temperatura, humedad y radiación solar para evaluar el comportamiento a largo plazo de los componentes del sistema de medición simulando condiciones reales en campo. Las pruebas piloto o iniciales incluyen pruebas experimentales controladas, a menor escala, sobre la estructura con el fin de inducir efectos que emulen eventos extraordinarios; estos simulacros debe realizarse junto con las autoridades involucradas en la seguridad, mantenimiento y servicio de la estructura para validar que cada uno de los protocolos de actuación se ejecute de la manera más eficiente, buscando que se cumpla con el objetivo establecido en las reuniones efectuadas con las autoridades.

4 Monitoreo remoto del puente Río Papaloapan

La metodología que se propone emplear para el desarrollo e implementación, tanto del Sistema Inteligente de Monitoreo como de los protocolos de actuación, es de tipo analítico-experimental y consta de siete etapas. La metodología presentada en el Capítulo 3 se aplica para el establecimiento de los protocolos de actuación en el monitoreo remoto del Puente Río Papaloapan, con el fin de generar una plataforma que se adapte al resto de puentes que en un futuro próximo serán monitoreados por el Centro de Monitoreo de Puentes y Estructuras Inteligentes del Instituto Mexicano del Transporte.

4.1. Caracterización

La caracterización es la primera etapa de la metodología propuesta se enfoca en dos vertientes. La primera corresponde a la estructura, consiste en obtener información relevante de la estructura en estudio, en este caso el Puente Río Papaloapan, la segunda vertiente concierne al sistema de monitoreo utilizado, el cual incluye el sistema de adquisición de datos, los sensores y equipo complementario instalado en la estructura.

4.1.1 Caracterización estructural del puente Río Papaloapan

La estructura en estudio es el Puente Río Papaloapan, ubicado en el kilómetro 85 + 980 de la autopista la Tinaja-Acayucan, en el estado de Veracruz. Fue construido en el año de 1994 y se puso en servicio en el año de 1995, es del tipo atirantado con un claro de 203 m y una longitud total de 407 m. El puente tiene 112 cables distribuidos en ocho semi-arpas con 14 cables cada una, ver figura 4.1.

En enero del año 2000, se fracturó el anclaje superior del tirante 11 de la torre 3, aguas arriba del lado agua. Un análisis posterior de la falla reveló que el material del anclaje era un acero con un tamaño de grano muy grande que lo hacía frágil y con una muy baja tenacidad, adicionalmente presentaba un alto contenido de porosidades e inclusiones, haciéndolo susceptible a falla por fatiga.

Al considerar la posibilidad de que otros elementos de anclaje del puente tuvieran características similares y pudieran llegar a fallar en un futuro próximo, se desarrolló una metodología de inspección no destructiva por ultrasonido que permitió detectar de los 112 elementos de anclaje, dos con alto contenido de poros e inclusiones y 14 con microestructura de tamaño de grano grueso.



Figura 4.1. Puente Río Papaloapan.

Posterior al estudio, se propuso un proyecto de rehabilitación que consistió en la sustitución de los 16 elementos de anclaje clasificados como “estructuralmente disfuncionales”, además de cuatro elementos clasificados como “estructuralmente aceptables”. En 2008 se realizó un proyecto de investigación para determinar la probabilidad de falla de los elementos de anclaje y calcular el índice de confiabilidad, posterior a la rehabilitación, a través de la calibración de un modelo de elemento finito y mediante pruebas dinámicas controladas, el cual se utilizó para correlacionar la demanda de las cargas vivas usando técnicas de simulación Monte Carlo.

Adicional a la condición en la que se encuentra la estructura, la zona geográfica en donde se sitúa el puente Río Papaloapan lo vuelve susceptible a fenómenos meteorológicos como ciclones, ya que se encuentra a 50 km en línea recta del golfo de México. Estas condiciones climáticas, además de generar carga dinámica adicional por efectos de lluvia intensa, también provocan cargas instantáneas por ráfagas de viento.

En lo que se refiere a sismos, el país se encuentra dividido en cuatro zonas sísmicas. Para realizar esta división se utilizaron los catálogos de sismos de la República Mexicana desde inicios de siglo pasado. La zona A es una zona donde no se tienen registros históricos de sismos, no se han reportado sismos en los últimos 80 años y no se esperan aceleraciones del suelo mayores a un 10% de la aceleración de la gravedad a causa de temblores. La zona D es una zona donde se han reportado grandes sismos históricos, donde la ocurrencia de sismos es muy frecuente y las aceleraciones del suelo pueden sobrepasar el 70% de la aceleración de la gravedad. Las zonas B y C son intermedias, donde se registran sismos no tan frecuentemente o son zonas afectadas por altas aceleraciones pero que no sobrepasan el 70% de la aceleración de la gravedad. Entre los límites de la zona B y C se encuentra el puente Río Papaloapan, en la figura 4.2 se ilustra con

una flecha descendente en color azul la ubicación del puente dentro del mapa de sismicidad en México.

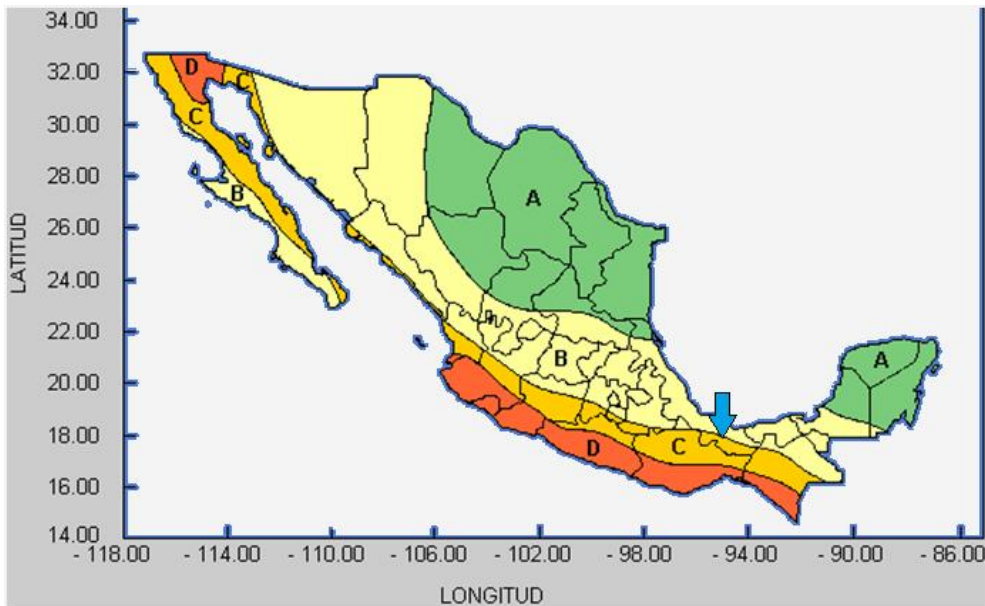


Figura 4.2 Zonas sísmicas en México.

A pesar de que el puente no se encuentra en la zona de mayor riesgo sísmico, es importante tomar en consideración este fenómeno geológico ya que, debido a la propagación del mismo, sus efectos dinámicos comúnmente son percibidos en la zona en donde se sitúa el puente.

4.1.2 Caracterización de la aplicación del monitoreo en el puente Río Papaloapan

Inicialmente, debido a la falla en el elemento superior de anclaje del puente, el objetivo del monitoreo se planeó para el seguimiento a largo plazo de varios parámetros estructurales críticos del puente en conjunto con pruebas controladas realizadas a intervalos periódicos.

Posteriormente, las estrategias de monitoreo se centraron en desarrollar una estrategia global que permitiera el monitoreo de varios puentes importantes en el país, ya que algunos han presentado algún tipo de problema durante su construcción o simplemente porque la inversión realizada en la construcción justifica el monitoreo.

El monitoreo permanente en el puente Río Papaloapan se pretende realizar durante un periodo de 10 años, de manera continua. Resulta primordial identificar los fenómenos asociados a los parámetros de interés para luego elegir los sensores, sistemas de adquisición y equipos complementarios acordes a las

necesidades del monitoreo para, finalmente, calibrar los equipos y sistemas para su puesta en operación.

4.1.2.1 Identificación de los fenómenos de interés

Conocer el comportamiento estructural del puente, de forma global, hace necesario dar seguimiento de manera independiente a parámetros fundamentales como la deformación en ciertos elementos estructurales del puente como las vigas principales.

Al ser un puente de tipo atirantado es necesario dar seguimiento a la tensión axial de los tirantes que cargan la superestructura del puente. Las pilas del puente son altamente sensibles a vibraciones, así como inclinaciones causadas por carga de viento o sismos.

Los efectos térmicos en el puente, particularmente visibles en la junta de expansión, hacen necesario el seguimiento del desplazamiento lineal de dicho elemento. Además de los fenómenos ambientales como: temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad de viento.

La mayoría de los efectos dinámicos en la estructura son provocados por el tránsito de vehículos, aunque las cargas estáticas y las causadas por efectos térmicos también aportan información valiosa. Estos últimos fenómenos presentan cambios lentos respecto al tiempo, por lo que para su monitoreo no se requiere de sistemas con alta frecuencia de muestreo.

4.1.2.2 Selección de sensores y sistema de adquisición de datos

Para el monitoreo a largo plazo del puente Río Papaloapan se eligieron sensores y sistemas de adquisición de datos basados en tecnología de fibra óptica, en específico rejillas de Bragg.

A esta tecnología se le conoce como FBG, *Fiber Bragg Grating* por sus siglas en inglés. Las principales características de los sistemas basados en fibra óptica son:

- Inmunidad a ruido electromagnético.
- Bajo consumo energético.
- Capacidad de instalar varios sensores en un único lazo.
- Larga estabilidad de medición a lo largo del tiempo.

A continuación se presenta en la tabla 4.1 información relevante tanto de los equipos de fibra óptica como de los sensores elegidos para la instrumentación del puente.

Tabla 4.1 Equipos y sensores de fibra óptica elegidos para el puente Río Papaloapan.

Cantidad	Nombre	Descripción	Marca	Modelo
1	Interrogador	Equipo de adquisición de datos de fibra óptica de 4 canales con frecuencia de adquisición máxima de 1000 Hz.	Micron Optics	sm-130
1	Multiplexor	Equipo que multiplexa los canales del interrogador para conseguir 16 canales.	Micron Optics	sm-041
1	Sensor de desplazamiento	Sensor empleado para medir desplazamientos.	Micron Optics	os5100
5	Sensores de temperatura	Sensor empleado para medir cambios de temperatura.	Micron Optics	os4350
8	Inclinómetros	Sensor empleado para medir inclinaciones.	FBG TECH	T1-310
24	Acelerómetros	Sensor empleado para medir vibraciones.	Micron Optics	os7100
24	Extensómetros	Sensor empleado para medir deformaciones unitarias en concreto.	Micron Optics	os3600

4.1.2.3 Selección de equipos complementarios

El sistema de monitoreo del puente Río Papaloapan requiere de un equipo que procese los datos obtenidos de los sensores, tanto para su almacenamiento como para ser enviados al Centro de Monitoreo de Puentes y Estructuras Inteligentes del Instituto Mexicano del Transporte cuando se presente algún evento extraordinario en la estructura; además, es necesario el uso de equipos auxiliares como la estación climatológica para asociar los eventos climatológicos, a través de los parámetros ambientales, con el comportamiento de la estructura, un sistema de video que cuando se requiera permita observar acontecimientos particulares en el puente. En la tabla 4.2 se mencionan los equipos complementarios que se eligieron para la instrumentación del puente.

Tabla 4.2 Equipos complementarios para instrumentación del puente Río Papaloapan.

Cantidad	Nombre	Descripción	Marca	Modelo
1	Sistema de procesamiento de datos	Equipo empleado como interfaz gráfica, procesamiento y almacenamiento de los sistemas de adquisición de datos, estación climatológica y sistema de video.	DELL	XPS 8300
1	Estación climatológica	Equipo basado en sensores piezoeléctricos empleado para medir parámetros ambientales como: temperatura, humedad relativa, radiación solar, velocidad y dirección del viento.	Weather Hawk	WXT 520
2	Cámara de video	Cámara tipo PTZ con 36x de zoom óptico y certificación IP68 para instalación en intemperie.	Bosch	MIC 400

4.1.2.4 Calibración del sistema de medición

Cada uno de los sensores adquiridos para el monitoreo del puente Río Papaloapan cuenta con su respectiva hoja de calibración, en la que se asocia el cambio de longitud de onda, generado por el láser del interrogador, con el parámetro estructural para el cual se diseñó el instrumento.

4.2 Definición de alarmas

4.2.1 Instrumentación del puente Río Papaloapan

La instrumentación del puente se realizó a finales del 2012. Ésta se planeó en dos etapas, la primera contempló la instalación de un sistema para el suministro eléctrico en el puente al no existir en las inmediaciones. Para ello, se instaló un sistema fotovoltaico que consiste en 96 paneles solares de 235 W cada uno, los cuales se distribuyeron en las caras del par de pilas del puente ubicadas aguas abajo (figura 4.3); 56 baterías de ciclado profundo con una capacidad de 12 VDC a 125 Ah para el almacenamiento de energía; seis controladores de carga de 60A empleados para cargar las baterías y tres inversores de corriente de 600 W, 1000 W y 1500 W para el suministro eléctrico final de los equipos a 120 VAC a 60 Hz.



Figura 4.3 Paneles solares en puente Río Papaloapan.

La segunda etapa se encaminó a la instrumentación, instalación de sensores y equipos adicionales. La instrumentación consistió en 62 sensores de fibra óptica distribuidos en todo el puente. De los 62 sensores 24 son extensómetros para concreto, 10 de estos sensores se instalaron sobre la cara inferior de la viga principal del puente del lado aguas abajo otros 10 se colocaron en la viga principal del lado aguas arriba, en ambos conjuntos la distribución de estos sensores sobre la viga principal fue cada 30 metros procurando cubrir la longitud total del puente, estos extensómetros se orientaron longitudinalmente respecto al flujo vehicular; los últimos cuatro extensómetros se instalaron longitudinalmente en cada una de las caras internas de las pilas, a una altura de 20 metros con respecto al tablero del puente. De los 62 sensores otros 24 son sensores de aceleración, de los cuales, 16 se colocaron en los tirantes N°4 y N°11 de las ocho semi-arpas que constituyen al puente a la mitad de la longitud total de cada tirante, en la figura 4.4 se observa un acelerómetro instalado en el tirante 4 de la semi-arpa 8. Los ocho acelerómetros restantes se instalaron en la parte superior de cada una de las cuatro pilas, distribuidos en pares para medir en cada pila las vibraciones en los planos longitudinal y transversal al tránsito vehicular. Otros ocho sensores de los 62 corresponden a inclinómetros, los cuales se colocaron en las pilas a la misma altura que los acelerómetros e igualmente orientados, en los planos longitudinal y transversal al tránsito vehicular. Del conjunto de 62 sensores, cinco corresponden a sensores de temperatura, tres de los cuales se instalaron en la cara inferior de la viga principal aguas arriba y los últimos dos se instalaron sobre la cara inferior de la viga principal aguas abajo, ambos grupos de sensores se distribuyeron de manera equidistante. Por último, el sensor de desplazamiento se colocó debajo de la junta de expansión ubicada al final del carril que se dirige hacia la caseta de Cosamalopan.



Figura 4.4 Acelerómetro instalado sobre tirante del puente Río Papaloapan.

Como equipo complementario a la instrumentación se instalaron dos cámaras de video en las caras internas del par de pilas aguas abajo, a una altura de 20 metros respecto al tablero del puente y una estación climatológica que se ubicó en la parte superior de la pila 2 que soporta a las semi-arpas 3 y 4. En la misma pila, pero a una altura de 12 metros respecto al tablero del puente, se instaló un gabinete con temperatura y humedad controlada, en el gabinete (figura 4.5), se centraliza el sistema de instrumentación que consta de la unidad de procesamiento con monitor, teclado y ratón; el interrogador de fibra óptica de cuatro canales, un multiplexor; la estación climatológica y el sistema de comunicación satelital.



Figura 4.5. Gabinete de control del puente Río Papaloapan.

A principios del 2013 se realizaron actividades de ajustes en el sistema de adquisición de datos para el almacenamiento continuo de la información proveniente de los sensores. El sistema instalado adquiere datos de manera continua de 62 sensores, a una frecuencia de 125 Hz, en bloques de dos minutos. Al cabo de un mes de almacenamiento de la información el conjunto de archivos llega a ocupar un espacio en el disco duro de 130 GB. Los datos se almacenan en el disco duro de la computadora ubicada en el gabinete central. Estos datos se trasladan del puente hacia el CMPEI mediante un disco duro, en periodos de un mes, para realizar un análisis detallado de la información. Como parte de la definición de alarmas es necesario contar con datos experimentales de cada uno de los sensores que se monitorean, además de realizar ajustes de distribución estadística por bloques de datos en cada sensor, para así establecer los límites de las de alarmas que serán precursoras a cada protocolo de actuación.

Las actividades que se realizan con la información proporcionada de los sensores para definir las alarmas del Sistema Inteligente de Monitoreo son:

- a) Cálculo de los límites de operación normal para las deformaciones instantáneas por carga viva.
- b) Cálculo de los límites de operación normal para el seguimiento de la media de deformación por carga viva.
- c) Cálculo de los límites de operación normal para el seguimiento del valor medio de la tensión axial en los tirantes N° 4 y N° 11 de cada semi-arpa, a través de la frecuencia natural de vibración.

4.2.2 Cálculo de los límites de operación normal para las deformaciones instantáneas por carga viva

Para el caso de los extensómetros, se obtuvieron las deformaciones generadas por el paso de los vehículos, principalmente camiones pesados, los cuales producen efectos de tensión (picos de deformaciones positivas) y efectos de compresión (picos de deformaciones negativas) en las fibras inferiores de las vigas principales. En total se emplearon 19 bloques de datos de 15 días, los cuales cubren el periodo de tiempo de junio 2013 a junio 2014. Para cada extensómetro se requirió obtener las máximas amplitudes de las deformaciones unitarias tanto a tensión como a compresión, picos positivos y negativos respectivamente, por cada bloque de datos de dos minutos. Esto es omitiendo las deformaciones por efecto térmico. Cada conjunto de datos de deformaciones, mencionadas anteriormente, se analizan en el software @Risk para ajustar los datos a una única distribución estadística para cada sensor, con ello se obtuvo la media y la desviación estándar del conjunto de datos. Cabe aclarar que se analizaron de manera independiente los fenómenos de tensión y los efectos por compresión de las cargas dinámicas para cada uno de los extensómetros instalados en el puente. Además, para diferenciar los sensores de deformación, los sensores instalados en el lado aguas arriba son identificados con la letra R,

mientras que los sensores instalados aguas abajo se les asocia la letra L. Debido a que la distribución estadística de cada bloque de 15 días no se ajustaba en todos los casos, se utilizó el criterio del menor error chi-cuadrado para elegir la distribución que mayor repetitividad presentara en todos los bloques de datos de 15 días. La importancia de ajustar los datos a una única distribución estadística radica en que a cada uno de los sensores instalados se les puede dar seguimiento a la distribución elegida con respecto al tiempo, en el momento en que los datos ya no se ajustan al tipo de distribución elegida, se deduce la existencia de una inconsistencia en el comportamiento usual del sensor.

En la figura 4.6 se muestra el ajuste de distribución estadística para el primer bloque de datos de 15 días correspondientes a las deformaciones a tensión registradas por el extensómetro R5 (aguas arriba). Se observa que para ese periodo de tiempo el comportamiento de las deformaciones se ajusta a la distribución gaussiana inversa en donde el eje de abscisas corresponde a las microdeformaciones unitarias registradas durante ese periodo y el eje de las ordenadas al porcentaje de la función de distribución.

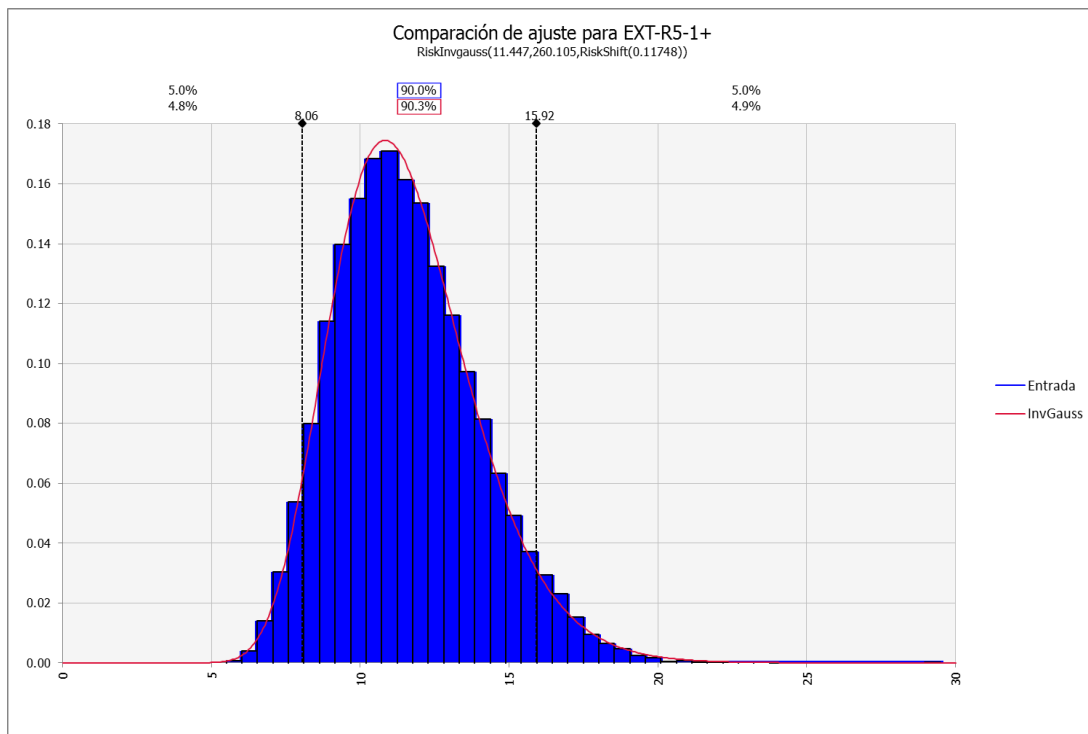


Figura 4.6 Ajuste de distribución del extensómetro R5.

Se muestran en las tablas 4.3 y 4.4 la distribución elegida por efectos de tensión y compresión en cada extensómetro instalado en las vigas principales del puente.

Tabla 4.3. Distribución elegida para las deformaciones positivas en el puente Río Papaloapan.

Extensómetros Aguas Arriba		Extensómetros Aguas Abajo	
Sensor	Distribución elegida	Sensor	Distribución elegida
Ext-R1	Gauss inversa	Ext-L1	Log-normal
Ext-R2	Gauss inversa	Ext-L2	Gauss inversa
Ext-R4	Pearson5	Ext-L4	Pearson5
Ext-R5	Gauss inversa	Ext-L5	Pearson5
Ext-R6	Normal	Ext-L6	Log-logística
Ext-R7	Gauss inversa	Ext-L7	Gauss inversa
Ext-R8	Gauss inversa	Ext-L8	Log-normal
Ext-R9	Pearson5	Ext-L9	Gauss inversa
Ext-R11	Gauss inversa	Ext-L11	Gauss inversa
Ext-R12	Gauss inversa	Ext-L12	Pearson5

Tabla 4.4 Distribución elegida para las deformaciones negativas en el puente Río Papaloapan.

Extensómetros Aguas Arriba		Extensómetros Aguas Abajo	
Sensor	Distribución elegida	Sensor	Distribución elegida
Ext-R1	Normal	Ext-L1	Logística
Ext-R2	Logística	Ext-L2	Logística
Ext-R4	Logística	Ext-L4	Logística
Ext-R5	Logística	Ext-L5	Logística
Ext-R6	Logística	Ext-L6	Beta general
Ext-R7	Logística	Ext-L7	Weibull
Ext-R8	Logística	Ext-L8	Logística
Ext-R9	Logística	Ext-L9	Logística
Ext-R11	Weibull	Ext-L11	Logística
Ext-R12	Logística	Ext-L12	Weibull

Con la distribución elegida para cada uno de los 20 extensómetro, se tabularon cada una de las medias obtenidas para cada conjunto de datos de 15 días, con ello se obtuvo la media anual del extensómetro para los efectos de compresión y tensión, además de los límites de operación normal tanto inferior como superior.

El límite superior se obtiene al sumarle al valor de la media anual, por deformaciones positivas, 2.5 desviaciones estándar calculadas del promedio de las desviaciones estándar registradas en cada uno de los 19 bloques de datos de información para las deformaciones positivas. A su vez, el límite inferior se genera

al restarle el valor de la media anual por deformaciones negativas, 2.5 desviaciones estándar computadas del promedio de las desviaciones estándar registradas en cada uno de los 19 bloques de datos de información para las deformaciones negativas.

Con lo anterior se obtiene una confiabilidad del 98.76 % para los valores dentro de los límites normales de operación. Se eligen los ± 2.5 desviaciones estándar debido a que únicamente los vehículos extremadamente pesados provoquen mayor amplitud de deformaciones en el puente y así los sensores los registren fuera de los límites de operación normal, lo que significa que únicamente 12 vehículos de transporte pesado salgan de los límites normales de operación por cada mil que transitan sobre el puente.

Como ejemplo de los límites normales de operación para las deformaciones, se muestra el extensómetro R5 en la figura 4.7. Los cuadros rojos representan las medias de cada bloque de datos de 15 días de las deformaciones positivas ajustadas a la distribución Gauss Inversa, mientras que los cuadros azules simbolizan las medias de las deformaciones negativas ajustadas a una distribución Logística. Por último, las líneas en color amarillo aluden a los límites de operación normal del periodo de un año de información para ese extensómetro en particular.

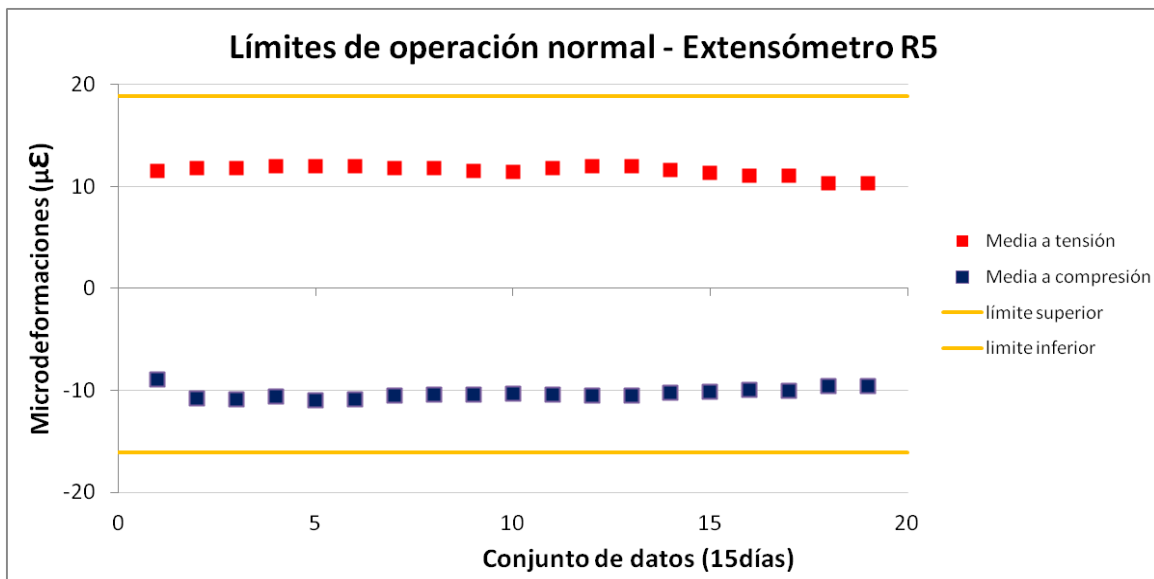


Figura 4.7 Límites normales de operación para el extensómetro R5.

El proceso anterior se aplica a cada uno de los 19 extensómetros restantes, del análisis de la información se obtienen un par de tablas en las cuales se muestra la media, la desviación estándar, el límite inferior y el límite superior bajo condiciones de operación normal, para el periodo de un año para cada extensómetro, tanto para deformaciones positivas como para las negativas.

En las tablas 4.5 y 4.6 se muestran los resultados obtenidos del cálculo de los límites normales de operación de las deformaciones, tensión y compresión, registradas por los extensómetros ubicados aguas arriba y aguas abajo, respectivamente, para el periodo de un año comprendido de junio de 2013 a junio de 2014.

Tabla 4.5 Media anual y límites de operación normal para extensómetros aguas arriba, en $\mu\epsilon$.

Sensor	Media anual compresión	Media anual tensión	σ anual compresión	σ anual tensión	Límite inferior	Límite superior
Ext-R1	-19.901	35.096	7.919	19.675	-39.698	84.285
Ext-R2	-15.832	21.652	7.261	11.204	-33.984	49.663
Ext-R4	-9.757	13.924	4.986	21.068	-22.223	66.594
Ext-R5	-10.305	11.537	2.321	2.915	-16.108	18.826
Ext-R6	-9.544	12.062	2.084	3.481	-14.753	20.765
Ext-R7	-20.681	49.839	12.478	43.232	-51.876	157.920
Ext-R8	-9.073	10.512	2.182	3.431	-14.527	19.088
Ext-R9	-9.912	10.238	2.675	2.999	-16.600	17.737
Ext-R11	-7.171	7.700	1.467	2.160	-10.841	13.101
Ext-R12	-8.721	11.274	2.094	4.141	-13.957	21.627

Tabla 4.6 Media anual y límites de operación normal para extensómetros aguas abajo; en $\mu\epsilon$.

Sensor	Media anual compresión	Media anual tensión	σ anual compresión	σ anual tensión	Límite inferior	Límite superior
Ext-L1	-20.606	37.773	9.283	24.835	-43.812	99.861
Ext-L2	-16.516	22.681	7.474	13.429	-35.202	56.255
Ext-L4	-16.689	21.809	9.111	16.605	-39.467	63.322
Ext-L5	-10.333	14.185	4.821	10.783	-22.385	41.143
Ext-L6	-21.017	40.086	9.262	33.988	-44.171	125.056
Ext-L7	-29.447	71.157	13.162	48.126	-62.351	191.473
Ext-L8	-25.034	36.989	12.539	23.653	-56.383	96.122
Ext-L9	-16.692	20.064	8.573	12.041	-38.123	50.166
Ext-L11	-17.099	22.745	7.442	13.051	-35.703	55.372
Ext-L12	-25.346	42.834	10.228	25.799	-50.917	107.332

De esta manera se obtienen los límites de operación normal para los sensores de deformación instalados en la cara inferior de las vigas principales (longitudinales) del puente. Estos límites se emplearán en el Sistema Inteligente de Monitoreo

para activar la alarma en el preciso momento en que la amplitud de deformación a tensión o compresión provocada por el paso de un transporte de carga sobrepase el valor calculado para el límite superior e inferior, respectivamente.

En la figura 4.8 se muestra un perfil de la media anual, con sus respectivos límites normales de operación de la combinación de las deformaciones positivas y negativas, para cada uno de los 10 extensómetros instalados en la viga principal del puente aguas arriba, dirección La Tinaja-Acayucan. Los valores graficados se obtuvieron de la tabla 4.5.

Para cada extensómetro se muestran con cuadros rojos la media anual de las deformaciones positivas y con cuadros azules, la media anual de las deformaciones negativas. Los valores de operación normal se limitan mediante la envolvente formada por el par de líneas en color amarillo.

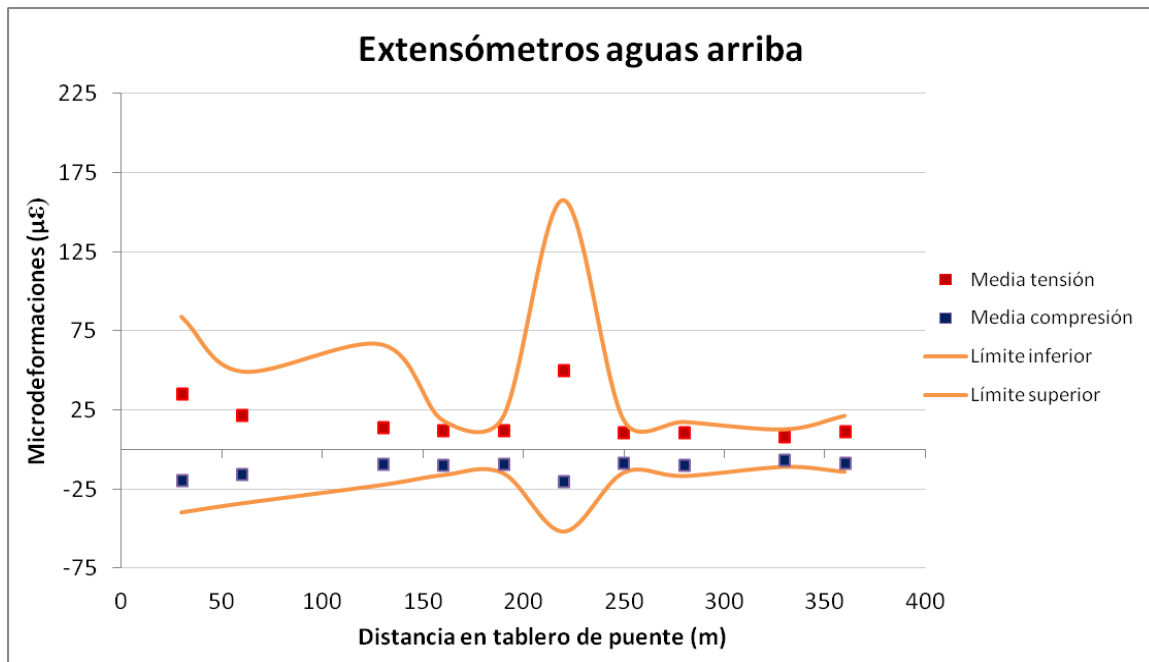


Figura 4.8 Perfil de medias anuales y límites de operación para extensómetros aguas arriba.

La figura 4.9 muestra el perfil de las deformaciones positivas y negativas, de la media anual con sus respectivos límites, para los 10 extensómetros instalados en la viga principal del puente aguas abajo, dirección Acayucan-La Tinaja. Los valores graficados se obtienen de la tabla 4.6.

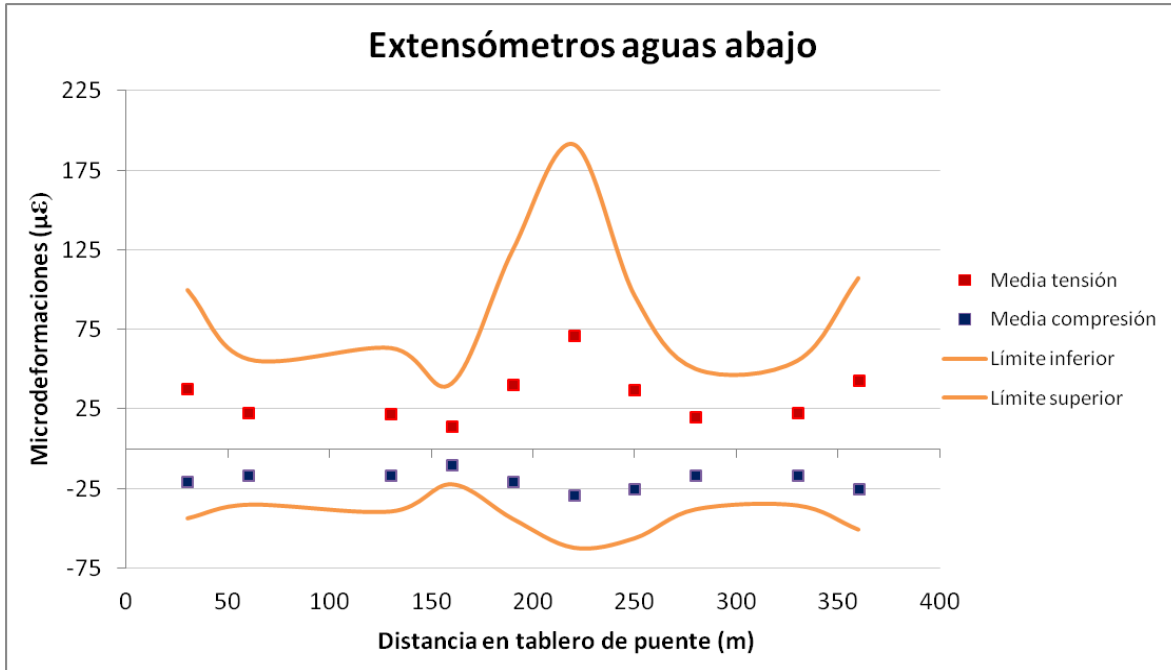


Figura 4.9 Perfil de medias anuales y límites de operación para extensómetros aguas abajo.

4.2.3 Cálculo de los límites de operación normal para el seguimiento de la media de deformación por carga viva

Al igual que el cálculo realizado para obtener los límites de operación normal de las deformaciones instantáneas, también se requiere para la activación de las alarmas dar seguimiento al comportamiento del valor medio de deformación causada por el flujo de vehículos. Al ser un parámetro que refleja una tendencia del comportamiento a lo largo del tiempo será calculado una vez que se tenga la información de 15 días del comportamiento para, posteriormente, obtener el valor de la media acorde al ajuste de distribución elegida.

El proceso es similar al realizado anteriormente hasta el paso en donde se calcula la media asociada al ajuste de distribución correspondiente a cada uno de los 19 bloques de datos, con 15 días de información cada uno. En este caso los límites de operación normal se obtienen del valor de la media anual ± 2.5 desviaciones estándar del conjunto de medias por cada sensor. La desviación estándar corresponde a la dispersión de las medias registradas en cada uno de los bloques de 15 días, hasta cubrir el periodo de un año de información.

La figura 4.10 muestra los límites de operación normal, en color amarillo, de las deformaciones a tensión registradas por el extensómetro R5 así como la tendencia de la media de deformación a tensión por carga viva, en cuadros color rojo, para cada uno de los bloques con 15 días de información.

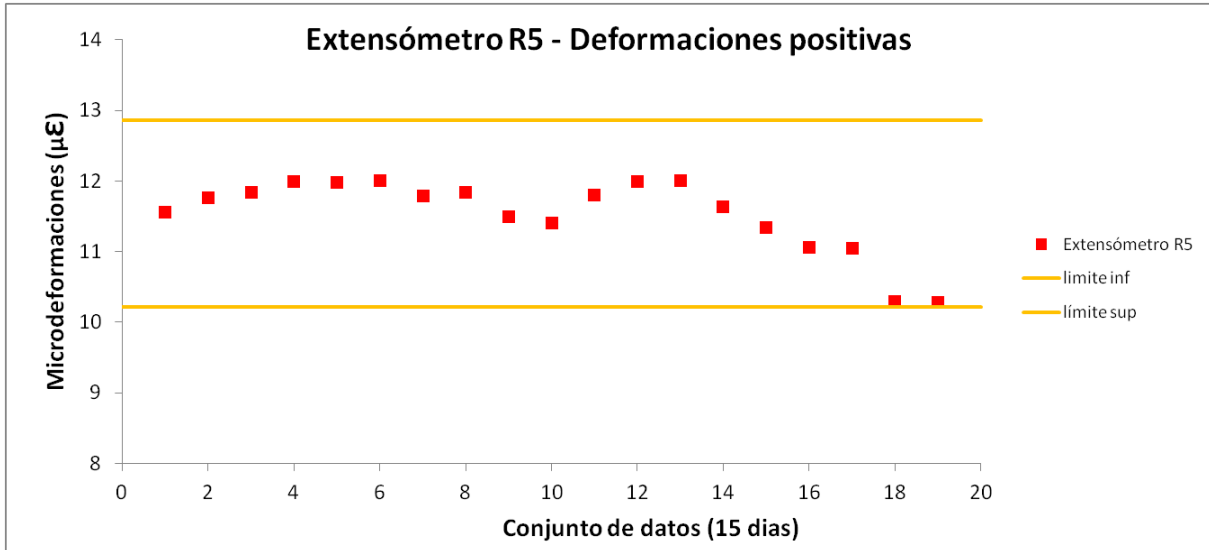


Figura 4.10 Límites de operación normal del valor medio de deformaciones positivas por carga viva para el extensómetro R5.

El proceso se repite para cada uno de los extensómetros, obteniendo cuatro límites por cada sensor, dos correspondientes al límite superior y límite inferior respecto a la media de deformaciones positivas y, a su vez, dos límites más de la media deformación negativa.

En las tablas 4.7, 4.8, 4.9 y 4.10 se recopila el resumen de los datos anuales calculados para los extensómetros instalados en las vigas principales del puente. Los datos compilados son la media de deformación por carga viva, la desviación estándar de los datos y los límites superiores e inferiores de comportamiento normal de operación en cada uno de los sensores de deformación.

El primer par de tablas representa la información de los sensores instalados aguas arriba, siendo la tabla 4.7 en donde se recopila la información de las deformaciones a tensión o positivas, provocada por el flujo vehicular; mientras la tabla 4.8 muestra los límites calculados inferior y superior de las deformaciones a compresión para el mismo grupo de sensores de deformación. En el último par de tablas se muestra la información de los extensómetros instalados aguas abajo siendo la tabla 4.9 la que compila los datos de las deformaciones a tensión y la tabla 4.10 se recopilan los límites superior e inferior de las cargas a compresión.

Tabla 4.7 Límites normales de operación de las deformaciones positivas para los extensómetros aguas arriba.

Sensor	Distancia (m)	Media anual ($\mu\epsilon$)	σ anual ($\mu\epsilon$)	Límite inferior ($\mu\epsilon$)	límite superior ($\mu\epsilon$)
Ext-R1	30	35.096	1.178	32.149	38.044
Ext-R2	60	21.652	0.559	20.254	23.050
Ext-R4	130	13.924	1.454	10.289	17.559
Ext-R5	160	11.537	0.530	10.211	12.862
Ext-R6	190	12.062	0.646	10.447	13.677
Ext-R7	220	49.839	6.973	32.406	67.272
Ext-R8	250	10.512	0.225	9.948	11.075
Ext-R9	280	10.238	0.303	9.478	10.998
Ext-R11	330	7.700	0.270	7.025	8.375
Ext-R12	360	11.274	0.656	9.633	12.914

Tabla 4.8 Límites normales de operación de las deformaciones negativas para los extensómetros aguas arriba.

Sensor	Distancia (m)	Media anual ($\mu\epsilon$)	σ anual ($\mu\epsilon$)	Límite inferior ($\mu\epsilon$)	límite superior ($\mu\epsilon$)
Ext-R1	30	-19.900	0.699	-21.649	-18.151
Ext-R2	60	-15.831	0.459	-16.983	-14.681
Ext-R4	130	-9.757	0.490	-10.981	-8.530
Ext-R5	160	-10.305	0.513	-11.588	-9.021
Ext-R6	190	-9.543	0.234	-10.130	-8.956
Ext-R7	220	-20.681	2.081	-25.885	-15.476
Ext-R8	250	-9.072	0.276	-9.762	-8.382
Ext-R9	280	-9.912	0.313	-10.695	-9.128
Ext-R11	330	-7.173	0.168	-7.595	-6.751
Ext-R12	360	-8.721	0.252	-9.352	-8.089

Tabla 4.9. Límites normales de operación de las deformaciones positivas para extensómetros aguas abajo.

Sensor	Distancia (m)	Media anual ($\mu\epsilon$)	σ anual ($\mu\epsilon$)	Límite inferior ($\mu\epsilon$)	límite superior ($\mu\epsilon$)
Ext-L1	30	37.772	2.789	30.799	44.746
Ext-L2	60	22.681	0.795	20.693	24.668
Ext-L4	130	21.808	6.209	6.284	37.333
Ext-L5	160	14.185	5.778	-0.261	28.631
Ext-L6	190	40.086	1.392	36.605	43.566
Ext-L7	220	71.157	5.816	56.617	85.697
Ext-L8	250	36.989	1.569	33.064	40.914
Ext-L9	280	20.063	1.397	16.570	23.556
Ext-L11	330	22.744	12.254	-7.890	53.380
Ext-L12	360	42.833	1.570	38.906	46.760

Tabla 4.10. Límites normales de operación de las deformaciones negativas para extensómetros aguas abajo.

Sensor	Distancia (m)	Media anual ($\mu\epsilon$)	σ anual ($\mu\epsilon$)	Límite inferior ($\mu\epsilon$)	límite superior ($\mu\epsilon$)
Ext-L1	30	-20.605	1.176	-23.547	-17.664
Ext-L2	60	-16.516	0.711	-18.294	-14.738
Ext-L4	130	-16.689	4.570	-28.115	-5.263
Ext-L5	160	-10.332	3.052	-17.964	-2.700
Ext-L6	190	-21.016	0.735	-22.855	-19.178
Ext-L7	220	-29.447	3.318	-37.744	-21.150
Ext-L8	250	-25.034	1.099	-27.783	-22.285
Ext-L9	280	-16.691	1.114	-19.478	-13.905
Ext-L11	330	-17.099	8.264	-37.761	3.562
Ext-L12	360	-25.346	0.923	-27.655	-23.036

En la figura 4.11 se observa un perfil del valor medio anual de los bloques de 15 días de información, con sus respectivos límites normales de operación tanto para efectos de tensión como para fenómenos de compresión, para cada uno de los 10 extensómetros instalados aguas arriba. Los valores se extraen de las tablas 4.7 y 4.8. Con cuadros rojos se indica la media anual de las deformaciones positivas y, a través de cuadros azules, la media anual de las deformaciones negativas. Los valores de operación normal se limitan mediante la envolvente formada por líneas continuas en color amarillo para el caso de las deformaciones a tensión, mientras que las deformaciones a compresión por las líneas amarillas segmentadas.

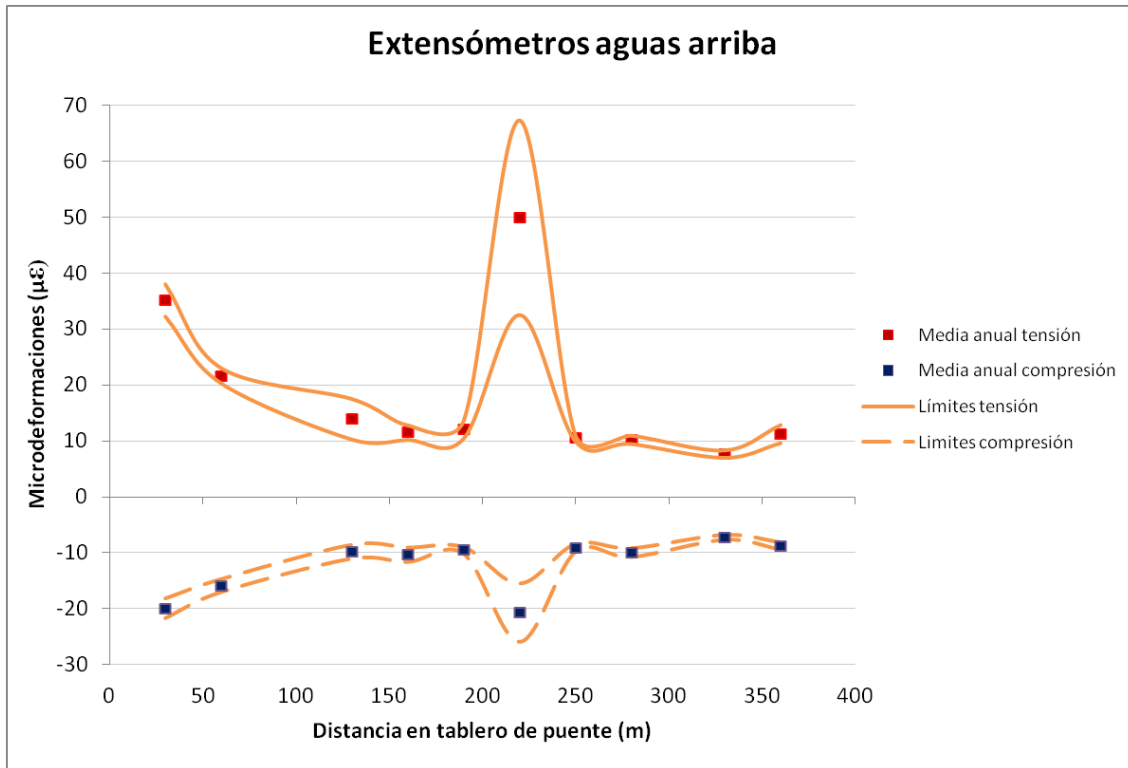


Figura 4.11. Perfil de medias y límites de operación normal para extensómetros aguas arriba.

Ahora se tienen los límites de operación normal para el seguimiento a mediano plazo del valor medio de deformación de los sensores instalados en la cara inferior de las vigas principales (longitudinales) del puente. Estos límites se emplearán en el Sistema Inteligente de Monitoreo para activar la alarma cuando la tendencia del valor medio de deformación a tensión o compresión obtenido del ajuste de distribución elegido de 15 días de información se encuentre fuera de alguno de los límites de operación normal calculado para el sensor.

4.2.4 Cálculo de los límites de operación normal para el seguimiento del valor medio de la tensión axial en los tirantes

Como se ha mencionado con anterioridad, el Puente Río Papaloapan tiene 112 tirantes, 14 por cada una de las ocho semi-arpas, en la instrumentación se instalaron dos acelerómetros en los tirantes N°4 y N°11 de cada semi-arpa. Dando un total de 16 acelerómetros colocados en los tirantes.

Debido a que los acelerómetros registran datos en g, equivalente a 9.81 m/s^2 se requiere un análisis dinámico en el dominio de la frecuencia. Por lo que se emplea la Transformada Rápida de Fourier, FFT por sus siglas en inglés, para pasar del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. Adicional, se utiliza un modelo

lineal (4.1) para obtener la tensión axial a la que está sometido el tirante a partir de la frecuencia de su primer modo de vibración.

$$f_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{T}{m}} \quad (4.1)$$

Donde n , es el número asociado al modo de vibrar, l es la longitud del cable, T es la tensión del tirante y m es la masa por unidad de longitud del tirante. La tensión del tirante por tanto se obtiene de la ecuación (4.1), la cual puede ser calculada en función del primer modo o como el promedio de dos o más modos de vibrar del tirante.

En general, la frecuencia encontrada en cada uno de los tirantes instrumentados corresponde al primer modo de vibración ya que, debido a la ubicación física del sensor, a la mitad del tirante, el instrumento es más sensible a registrar las frecuencias naturales, así como los modos impares de vibración.

De un análisis de vibración realizado después de la rehabilitación del puente, en el año 2005, se obtuvo la información presentada en la tabla 4.11, en la que se muestra el primer modo de vibración en Hertz de cada uno de los 112 tirantes. Para obtener dichos valores se empleó un acelerómetro piezoeléctrico de muy baja frecuencia y alta sensibilidad. De cada uno de los tirantes se obtuvo el primer, segundo y tercer modo de vibración a través del promedio de tres muestras consecutivas. Por último, se obtuvo el primer modo al sumar los valores del primer, segundo y tercer modo calculados anteriormente y se dividió entre 6.

Tabla 4.11 Frecuencia natural de los tirantes del puente Río Papaloapan calculados en 2005.

Tirante	SEMI-ARPA							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	7.354	7.212	7.135	7.129	7.493	6.885	7.747	7.087
2	4.878	5.271	5.484	5.017	4.806	5.285	4.851	4.927
3	4.129	4.465	4.375	4.205	4.094	4.667	4.365	4.101
4	3.354	3.764	3.410	3.306	3.389	3.444	3.587	3.451
5	2.927	3.028	2.875	2.781	2.771	2.872	3.017	2.861
6	2.500	2.590	2.514	2.542	2.542	2.486	2.563	2.458
7	2.219	2.302	2.271	2.281	2.299	2.118	2.236	2.250
8	2.045	2.052	2.028	2.108	2.073	2.094	2.045	2.038
9	1.844	1.875	1.896	1.934	1.865	1.813	1.858	1.819
10	1.708	1.715	1.799	1.788	1.750	1.778	1.726	1.681
11	1.563	1.583	1.663	1.608	1.507	1.566	1.594	1.521
12	1.420	1.469	1.535	1.472	1.524	1.528	1.497	1.448
13	1.253	1.330	1.396	1.340	1.330	1.378	1.285	1.212
14	1.188	1.090	1.149	1.163	1.153	1.125	1.021	1.160

Con los datos anteriores se obtuvo una referencia confiable del primer modo de vibración para los 16 tirantes de interés, ocho correspondientes a los tirantes 4 y los otros 8 a los tirantes 11.

El proceso para obtener los límites de alarma en operación de los acelerómetros, es similar al utilizado para los extensómetros. La diferencia principal radica en que los datos de los extensómetros se analizaron sin cambiar de unidades, a diferencia de los acelerómetros que mediante la ecuación (4.1) se cambia de la frecuencia de vibración del tirante a la tensión axial del mismo.

Mediante el uso de un programa desarrollado en LabVIEW se encuentra la frecuencia de vibración de cada tirante, posteriormente este valor se convierte a tensión axial en el tirante, por bloque de datos de 2 minutos, debido a este intervalo de tiempo (120 s) la resolución de frecuencia en el procesamiento es de 0.00833 Hz. Además, al ser la frecuencia de adquisición de datos de 125 Hz, la máxima frecuencia medible es 62.5 Hz estando este valor alejado de las frecuencias de interés que oscilan entre 1.5 Hz y 3.3 Hz para los acelerómetros instalados en los tirantes 11 y 4, respectivamente. Por último, se juntan los datos obtenidos en bloques de 15 días. Para cada tirante se genera un ajuste de distribución estadística con @Risk, además de obtener la media y la desviación estándar de ese conjunto de datos.

En la figura 4.12 se muestra el ajuste de distribución estadística de la tensión del tirante 4 de la semia-arpa 1, correspondiente al bloque de información de 15 días con fecha de inicio a partir del 16 de octubre del 2013. Para este ejemplo se observa que el conjunto de datos de entrada se ajusta, en primera instancia, a una función de distribución Erlang, pero se selecciona la función Log-logística con tensión axial media de 1528.9866 kN (155.86 t), al presentar mayor cantidad de repeticiones en el resto de bloques de datos de 15 días.

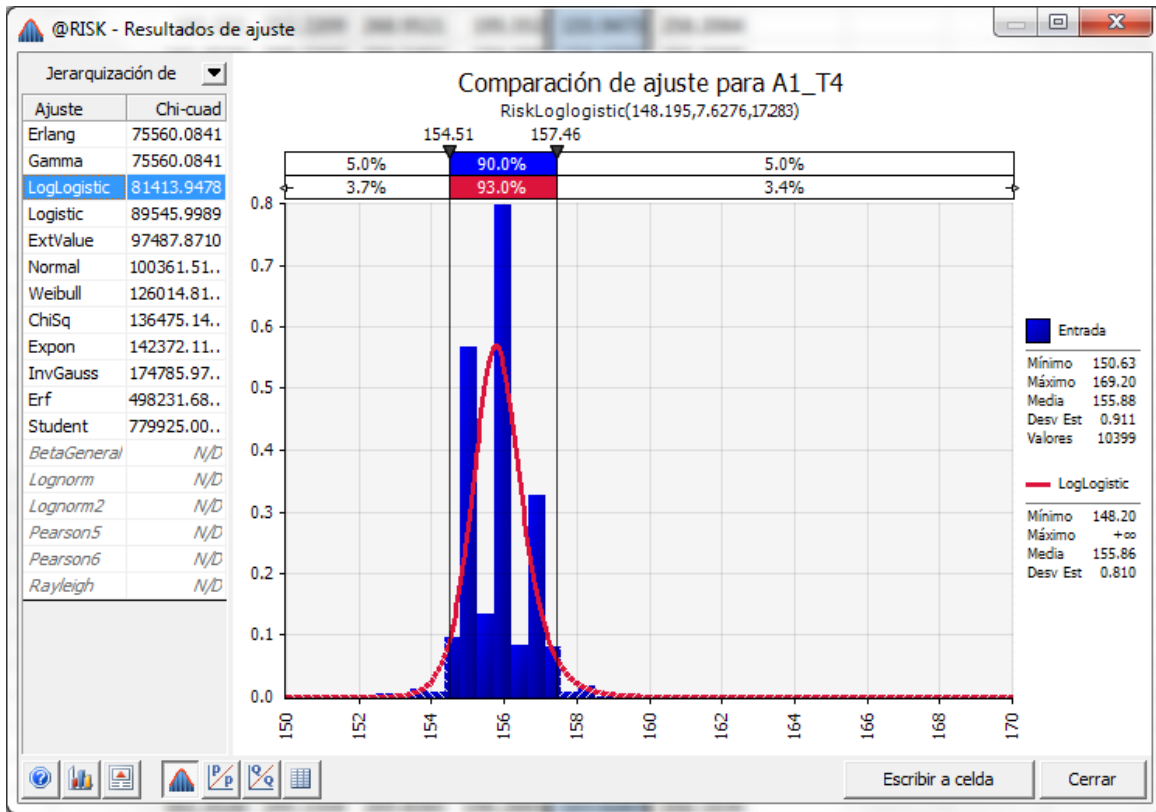


Figura 4.12 Ajuste de distribución de la tensión en el tirante 4 de la semi-arpa 1.

Como en el caso de los extensómetros, para cada uno de los 16 tirantes instrumentado se tabula la distribución elegida para posteriormente ser empleada como referencia para las siguientes mediciones.

En la tabla 4.12 se observan las distribuciones elegidas por cada tirante después de realizar el proceso descrito anteriormente en cada uno de los 20 bloques de 15 días de información.

Tabla 4.12 Distribución elegida para los tirantes instrumentados en el puente Río Papaloapan.

Tirante	SEMI-ARPA							
	Aguas abajo				Aguas arriba			
	1	2	3	4	5	6	7	8
4	Log-Logística	Logística	Logística	Logística	Logística	Logística	Log-Logística	Logística
11	Logística	Normal	Normal	Logística	Log-Logística	Logística	Logística	Log-Logística

Después de seleccionar la distribución que más se ajusta al comportamiento de los acelerómetros, se tabulan cada una de las medias obtenidas para cada

conjunto de datos de 15 días, siendo un total de 20 bloques de datos, con ello se obtuvo la media anual del tirante asociado al acelerómetro, además de los límites de operación normal tanto inferior como superior, para la activación de las alarmas; estos últimos generados a partir de ± 2.5 desviaciones estándar, con una confiabilidad del 98.76%.

De esta manera se generan las medias junto con los límites inferior y superior para cada uno de los 16 tirantes instrumentados. En la figura 4.13 se muestra como ejemplo la tendencia de las medias de las tensiones del tirante 4 de la semi-arpa 1, junto con sus respectivos límites de operación. Esto para el periodo de un año.

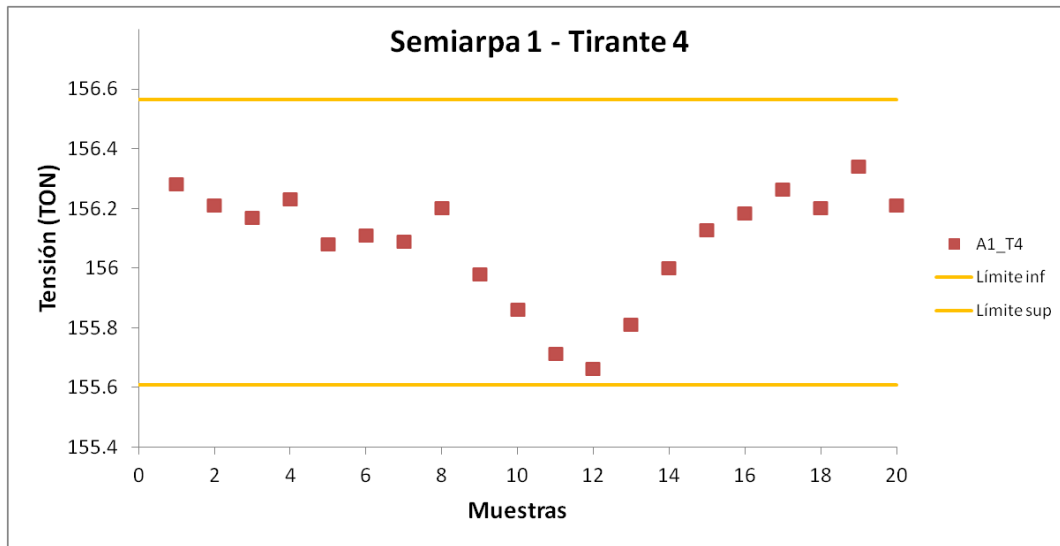


Figura 4.13. Límites normales de operación de la tensión en el tirante 4 de la semi-arpa 1.

En cada uno de los 16 tirantes instrumentados se calculan los límites de operación normal, la información obtenida se muestra en la tabla 4.13, en donde para cada sensor se tiene la media, desviación estándar y los respectivos límites tanto inferior como superior para el periodo que comprende de junio del 2013 a junio del 2014.

Tabla 4.13 Tensión axial anual en tirantes instrumentados del puente Río Papaloapan en kN.

Sensor	Media anual	Desviación anual	límite inferior	límite superior
A1-T4	1560.8617	1.910329	1556.0859	1565.6375
A1-T11	2582.594	3.52774	2573.774	2591.413
A2-T4	1950.835	2.07781	1945.64	1956.029
A2-T11	2678.641	1.02134	2676.088	2681.194
A3-T4	1619.534	7.99807	1599.538	1639.529
A3-T11	2906.823	1.97449	2901.887	2911.759
A4-T4	1507.436	4.18994	1496.961	1517.91
A4-T11	2723.79	5.68821	2709.57	2738.011
A5-T4	1580.21	4.32123	1569.4069	1591.0131
A5-T11	2460.976	3.65552	2451.837	2470.114
A6-T4	1625.12	6.32716	1609.302	1640.938
A6-T11	2611.42	1.76645	2606.983	2615.816
A7-T4	1772.859	0.86853	1770.6877	1775.0303
A7-T11	2692.977	0.93334	2690.644	2695.31
A8-T4	1630.21	3.46525	1621.547	1638.873
A8-T11	2476.862	1.60387	2472.853	2480.872

Con el proceso anterior se obtienen los límites de operación normal para el seguimiento a mediano plazo del valor medio de la tensión axial en los tirantes 4 y 11 del puente Río Papaloapan. Estos límites son útiles para el Sistema Inteligente de Monitoreo como precursores para activar la alarma cuando la tendencia del valor medio de la tensión, en alguno de los tirantes, obtenido del ajuste de distribución elegido de 15 días de información se encuentre fuera de alguno de los límites de operación normal calculado para dicho sensor.

4.3 Reunión con las autoridades y responsables

Después de definir claramente los fenómenos a medir, los umbrales para la activación de las alarmas y los límites normales de operación de los parámetros de interés, es importante ejecutar reuniones para involucrar a las autoridades responsables de las actividades de conservación de la infraestructura del puente Río Papaloapan; así como a las autoridades encargadas de preservar la integridad física de los usuarios de esta vía de comunicación para juntos definir las acciones apropiadas posterior a recibir una alarma.

Al ser el IMT un órgano de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes se debe informar respecto a eventos que comprometa la integridad estructural del puente. Además, en su labor de impulsar el crecimiento económico, la integración regional y el desarrollo social, la SCT debe conservar, modernizar y ampliar la infraestructura de transporte.

Las actividades de conservación, mejoramiento y reconstrucción del puente Río Papaloapan, así como las relacionadas con su administración y explotación, se encuentra a cargo de Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos, que es un Organismo Descentralizado de la Administración Pública Federal.

La Policía Federal en su División de Seguridad Regional es la encargada de establecer las políticas de control y los dispositivos de vigilancia en la imposición de las sanciones por violaciones a las disposiciones legales y reglamentarias relativas al tránsito de vehículos en caminos y puentes federales, así como a la operación de los servicios de autotransporte federal, sus servicios auxiliares y transporte privado cuando circulen en la zona terrestre de las vías generales de comunicación.

En lo relativo a efectuar acciones enfocadas a la protección y prevención contra los peligros que se presente a los usuarios al transitar sobre o debajo del puente Río Papaloapan, la delegación del Sistema Nacional de Protección Civil, en su Región Sureste, es la facultada para alertar y mantener informada a la población ante algún riesgo latente, procurando realizar actividades que eliminen o reduzca pérdidas humanas, destrucción de bienes materiales y daño a la naturaleza, así como preservar las funciones esenciales de la sociedad.

Por último, cuando sea necesaria su colaboración, la Cruz Roja Mexicana -en su delegación Cosamaloapan- es la encargada de brindar auxilio y ofrecer los servicios de atención médica pre-hospitalaria, ambulancia y rescate especializado.

4.4 Generación de protocolos de actuación

En los puntos anteriores se desarrollaron las ideas para visualizar de manera lógica los posibles eventos que puedan ocurrir en el puente, con el objetivo de que el Sistema Inteligente de Monitoreo reconozca eventos que permitan realizar de manera automática la mejor gestión de la información.

Enseguida se comenzó a trabajar con el primer nivel de alarmas, el cual corresponde al monitoreo continuo del comportamiento estructural del puente, niveles de alarma basados en los límites normales de operación, mediante los cuales se evalúan las mediciones directas de los sensores relacionados con los elementos estructurales críticos y la información se compara con los límites normales de operación obtenido de las ± 2.5 desviaciones estándar del valor de la media anual por cada sensor.

Cabe hacer mención que el valor de ± 2.5 desviaciones estándar es un parámetro empleado para evitar que las alarmas se activen constantemente ya que en el caso de los sensores de deformación equivale a 12 picos fuera de los límites normales de operación de 1000 picos registrados.

4.4.1 Diagrama de flujo para el primer nivel de alarma

Con la información anterior se desarrolló un diagrama general que consiste en el flujo de decisiones cuando alguno de los sensores instalados en el puente, durante el monitoreo continuo, se encuentre fuera de los límites de operación normal.

Cuando ocurre un evento extraordinario se almacena en la computadora del puente la información del sensor que superó los límites preestablecidos así como un bloque de datos, que incluyen la respuesta dinámica de todos los sensores, y el video correspondiente a antes y después de ser activada la alarma. Posteriormente, la información se envía al CMPEI en donde se revisan los datos y el video para determinar las causas de la alarma, enseguida se evalúa la alarma con la información anterior para, posteriormente, dar aviso a las autoridades y realizar un análisis adicional si la situación lo amerita. En la figura 4.14 se muestra el diagrama de flujo después de que un sensor sobrepasa los límites normales de operación. Este diagrama principal consiste en siete sub-procesos que serán ejecutados únicamente cuando se requiera.

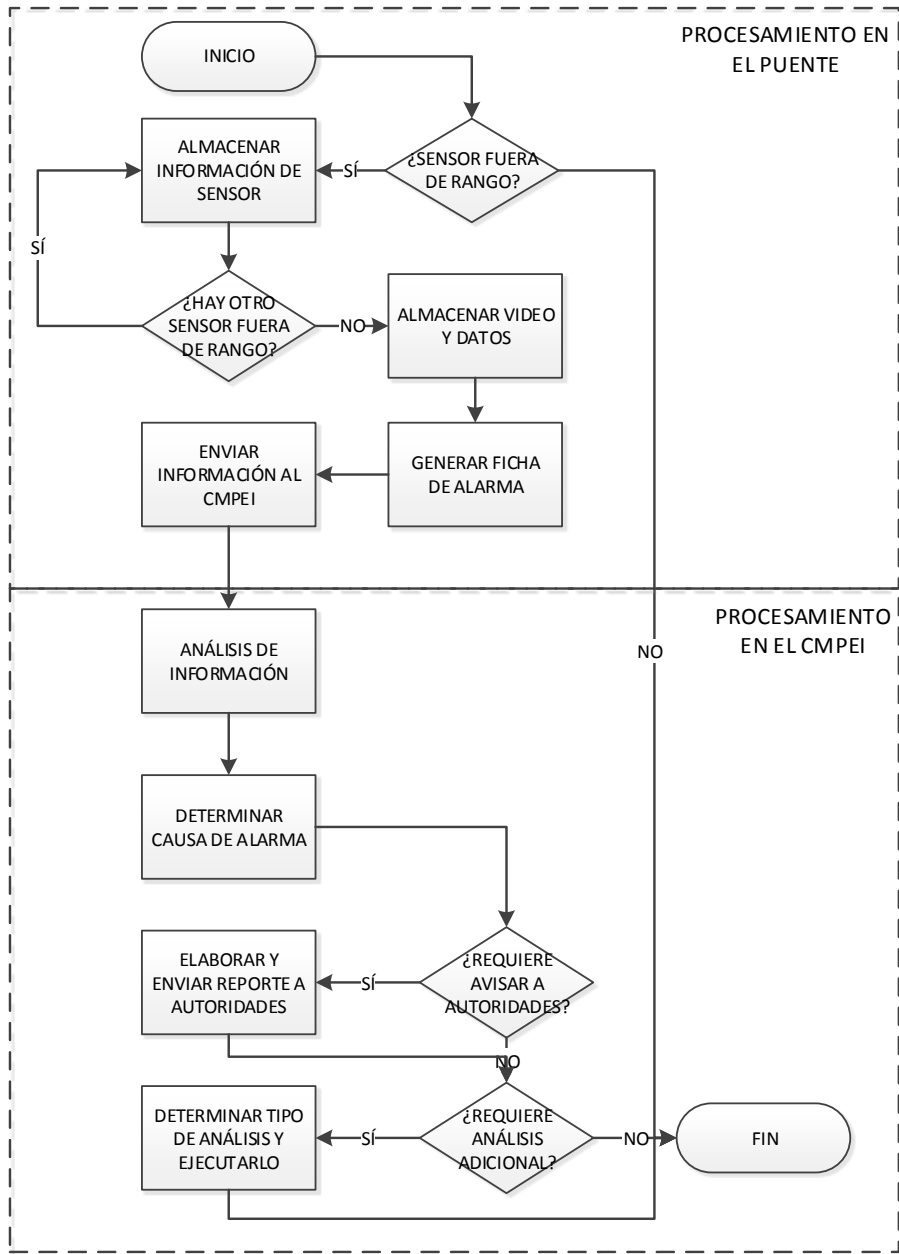


Figura 4.14 Diagrama de flujo general para el primer nivel de alarma.

A continuación se describen cada uno de los ocho procesos secundarios o sub-diagramas que intervienen dentro del diagrama principal. No necesariamente intervienen cada uno de ellos cuando se registra una alarma, ya que el diagrama de flujo principal presenta bifurcaciones en las cuales existen situaciones que no ameritan la ejecución de todos los sub-procesos. Por ejemplo, en algunas situaciones no se amerita informar a las autoridades, ni tampoco realizar un análisis adicional para determinar la causa de la alarma.

4.4.1.1 Almacenamiento de la información del sensor

Este subproceso se encarga de determinar la información más relevante del evento extraordinario como la fecha y hora en que se suscitó la alarma, el tipo de alarma, tipo y nombre del sensor, la máxima amplitud que se registró, así como obtener el nombre del archivo de datos donde se almacenan los datos del monitoreo antes y después al evento, para posteriormente almacenar la información en un archivo de texto por cada día de monitoreo, ver figura 4.15.

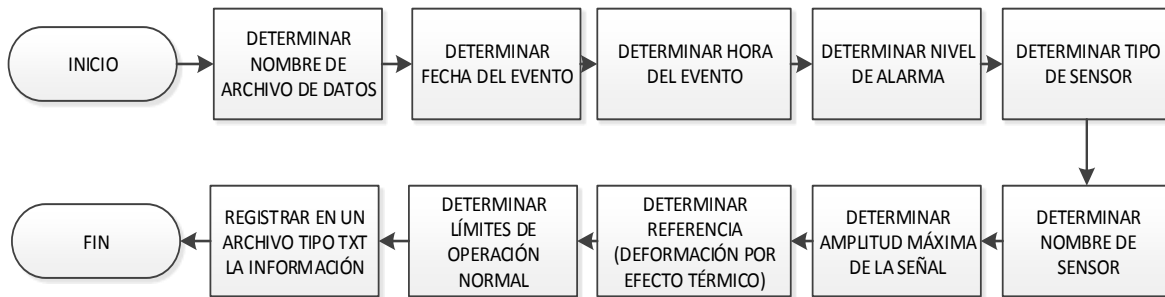


Figura 4.15 Diagrama para almacenar información de sensor.

4.4.1.2 Almacenamiento de video y datos

En este sub-proceso, ver figura 4.16, se almacenan tanto los datos de todos los sensores como el video de las cámaras un minuto antes y un minuto después de ocurrir un evento extraordinario. Contar con esta información permite determinar las posibles causas que provocaron la alarma, así como conocer la condición posterior de los sensores en el puente para tomar una mejor decisión sobre las acciones a ejecutar.

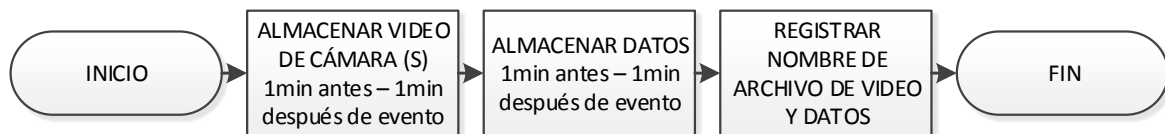


Figura 4.16. Diagrama para almacenar video y datos.

4.4.1.3 Generación de ficha de alarma

Se recaba información del puente que detectó la alarma, así como de los datos relevantes del sensor que la activó junto con el bloque de datos antes y después de la alarma. Los datos anteriores se vacían automáticamente en una plantilla de Excel que será el formato de alarma pre-llenado. El detalle del sub-proceso se observa en la figura 4.17.

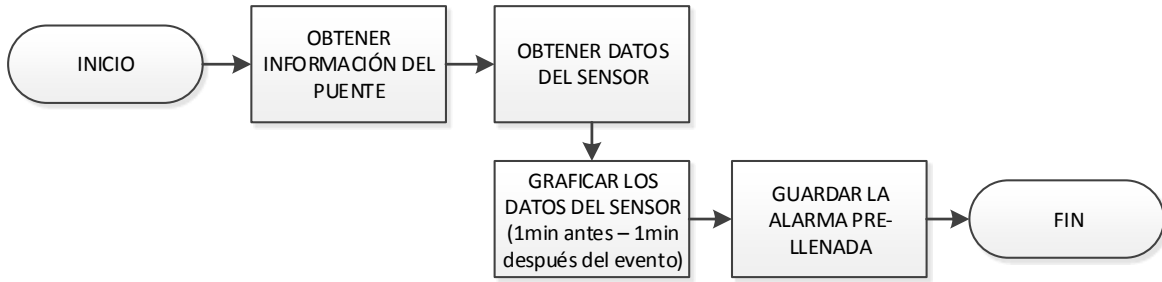


Figura 4.17 Diagrama para generar ficha de alarma.

4.4.1.4 Envío de información al CMPEI

Después de recopilar la información relevante del evento extraordinario registrado en el puente, es importante transmitir esa información al CMPEI, ver figura 4.18, para que un ingeniero determine la causa de la alarma y el riesgo que implica el evento registrado.

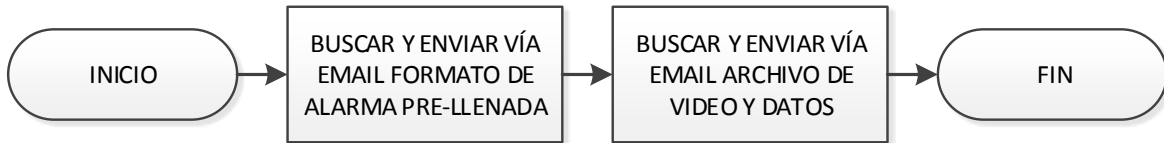


Figura 4.18 Diagrama para enviar información al CMPEI.

4.4.1.5 Análisis de datos

Lo siguiente es determinar la condición estructural del puente después del evento. Para ello se elige el sensor o sensores que sobrepasaron sus límites de operación normal para posteriormente realizarles un análisis de tendencia. En la figura 4.19 se muestra el diagrama.

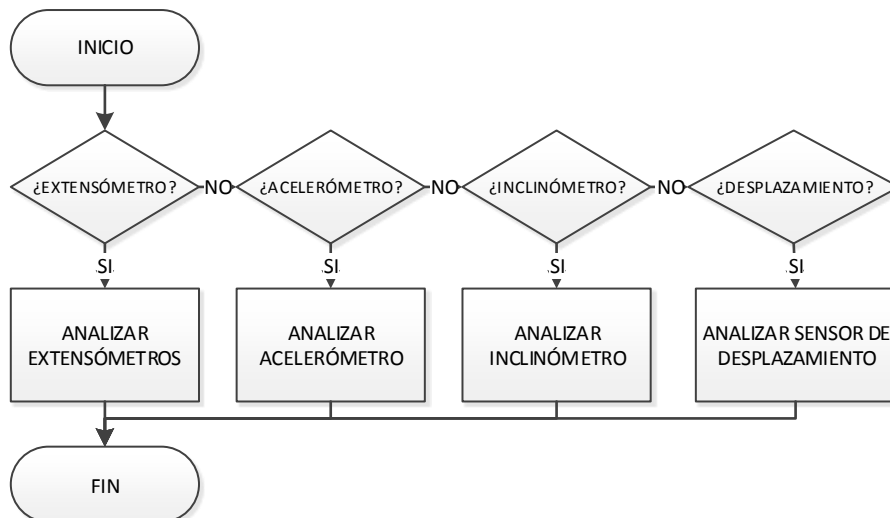


Figura 4.19 Diagrama para análisis de datos por cada sensor.

4.4.1.6 Determinación de la causa de alarma

En este momento se conocen los sensores que intervinieron en la activación de la alarma, también se cuenta con los datos y video, pero se desconoce la causa que provocó el evento extraordinario. Por tal razón, este sub-proceso interviene para determinar la causa por la cual se inició la alarma, ver figura 4.20. Entre las principales causas están las provocadas por tránsito pesado por uno o más vehículos, condiciones climatológicas como lluvia o fuertes ráfagas de viento, sismo, falla súbita de algún elemento estructural o alguna otra situación.

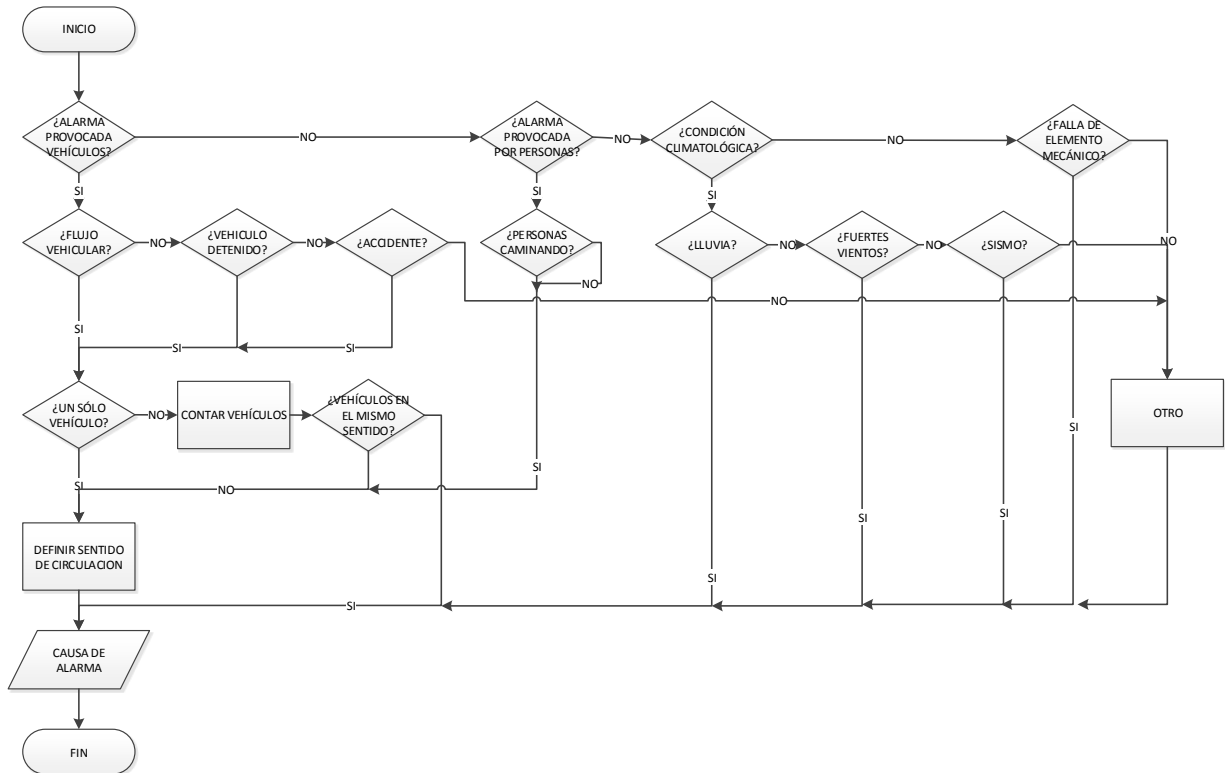


Figura 4.20 Diagrama para determinar causa de la alarma.

4.4.1.7 Elaboración y envío de reporte a autoridades

Después de recibir la información completa de la alarma en el CMPEI y haber concluido el análisis de la información se debe tomar la decisión de avisar a las autoridades responsables del puente: Protección civil local, Policía Federal, Secretaria de Comunicaciones y Transportes, Caminos y Puentes Federales, Dirección General de Conservación de Carreteras u alguna otra dependencia o institución. Es prioritario decidir si se da aviso de manera urgente a las autoridades involucradas, o se le avisa formalmente con un reporte de la situación actual en el puente, así como algunas sugerencias de mantenimiento si es que fuera necesario. En la figura 4.21 se muestra el diagrama de flujo del sub-proceso descrito con anterioridad.

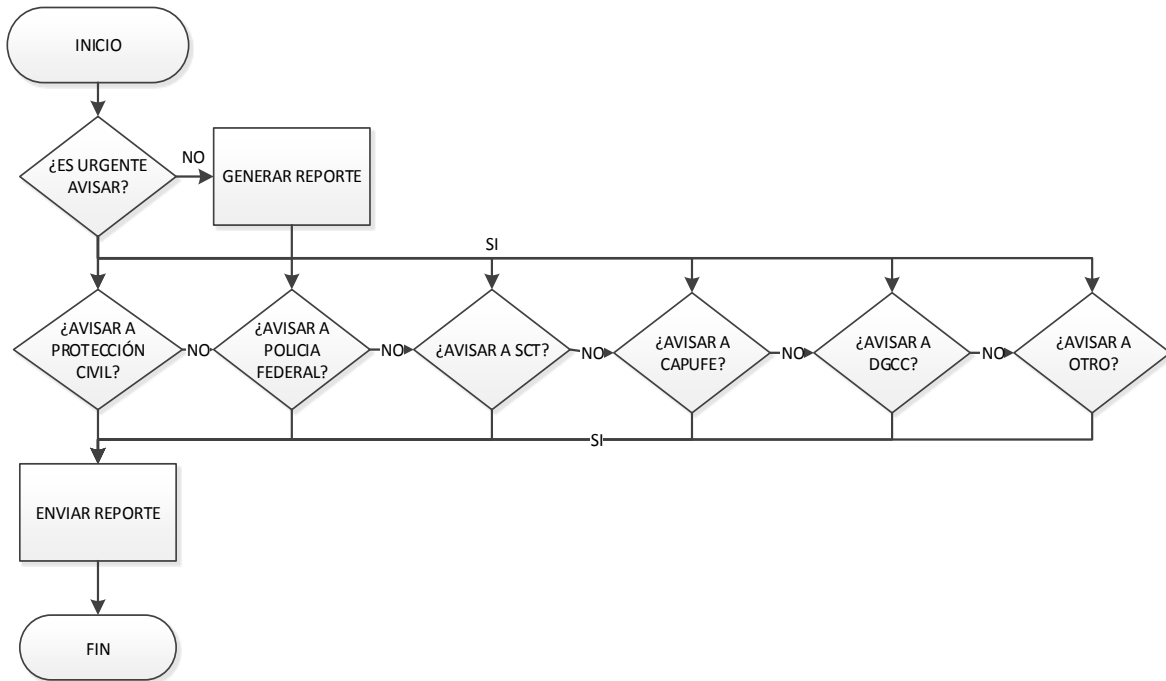


Figura 4.21 Diagrama para elaborar reporte y avisar a las autoridades.

4.4.1.8 Determinación y ejecución de análisis adicional

Por último, si la situación lo amerita, se realiza un análisis complementario para determinar posible falla o simplemente para asegurar la condición estructural del puente, ver figura 4.22. Algunos de los análisis a considerar son: seguimiento a la tendencia diaria, semanal o mensual de uno o más sensores, cálculo del modo de vibración de las vigas principales, cálculo de la tensión en uno o más tirantes en el puente, análisis de correlación entre sensores de interés o algún otro análisis adicional.

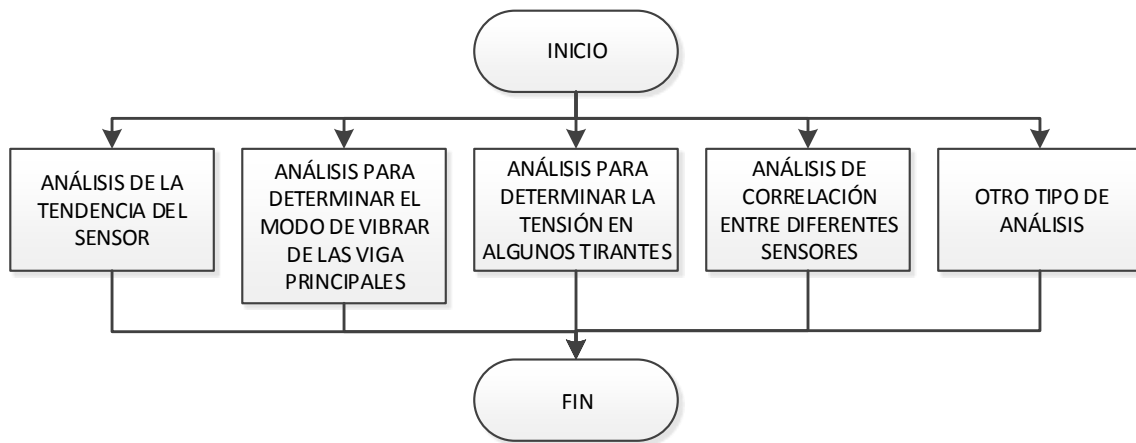


Figura 4.22 Diagrama para realizar análisis adicional.

4.4.2 Diagrama de flujo para el segundo nivel de alarma

El segundo nivel corresponde al monitoreo y evaluación de los índices de desempeño estructural (monitoreo de mediano plazo), los cuales se calcularán de las tendencias de las mediciones directas de los sensores y estarán encaminados a dar valores indicativos del comportamiento global del puente, vigilando el comportamiento y variaciones a largo plazo.

El SIM almacena por cada día de información un vector con los datos recopilados durante ese día. Completándose 15 días de datos continuos, se realiza el ajuste de distribución de los datos buscando el arreglo a la función de distribución que se eligió para cada sensor. Del ajuste se obtiene la media, desviación estándar de los datos y cantidad de elementos, estos datos son almacenados. El valor de la media se compara con los límites de tendencia normal: siendo el límite inferior la media de tendencia anual -2.5 desviaciones estándar respecto a la media; mientras que el límite superior se calcula de la media de tendencia anual $+2.5$ desviaciones estándar. En el caso de que el valor de la media se encuentre fuera de los límites ya mencionados o que la función de distribución elegida ya no se ajuste a los datos de entrada, se generará una alarma y enseguida se analizarán los datos para determinar la causa que provocó el cambio. Después de determinar la causa de la alarma se estructurará de tal manera que se enviará la información a las autoridades y se realizará un análisis adicional si es requerido. En la figura 4.23 se observa el diagrama de flujo general correspondiente al segundo nivel de alarma, el cual está compuesto por siete sub-procesos. El primer sub-proceso se realiza en el puente, mientras que el resto se efectúan en el CMPEI por personal del IMT.

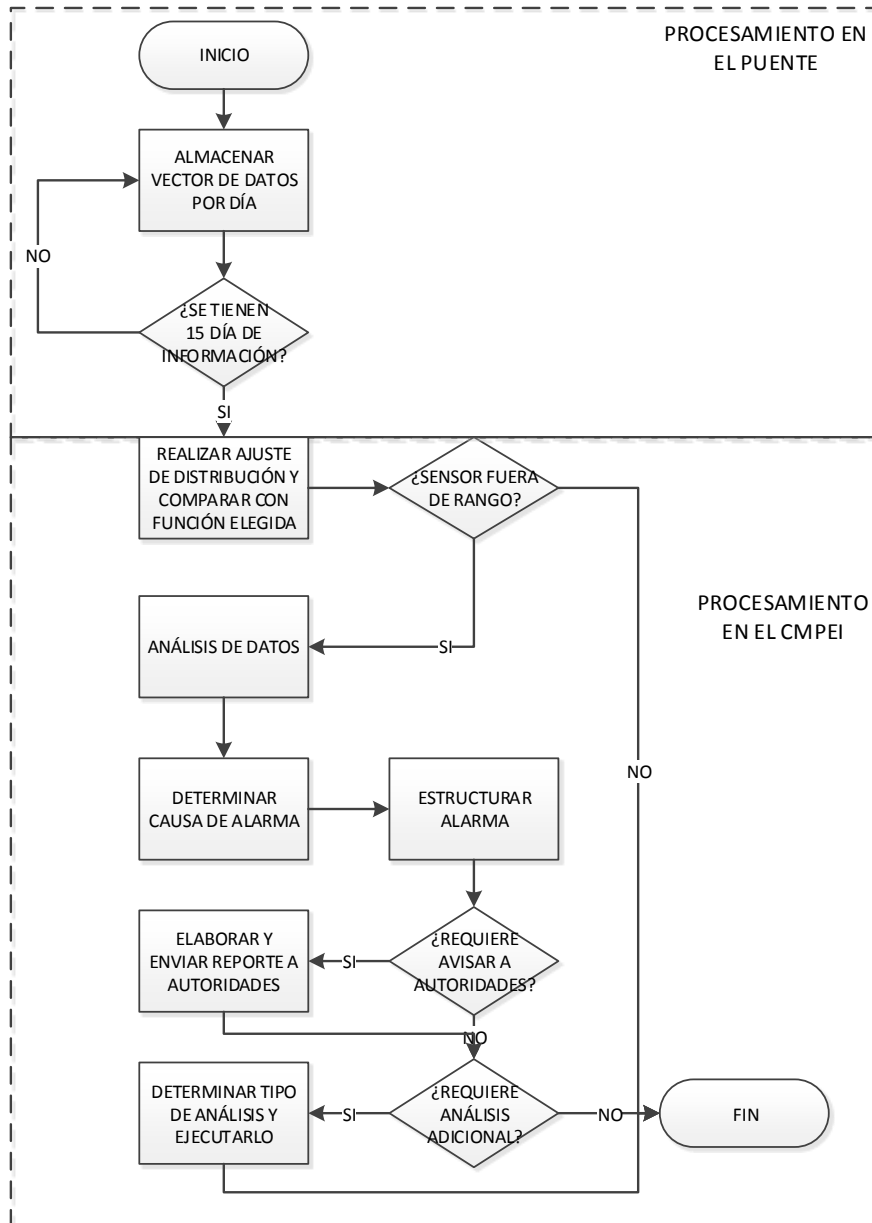


Figura 4.23 Diagrama de flujo general para el segundo nivel de alarma

A continuación se describen sólo los dos primeros sub-diagramas que intervienen dentro del diagrama de flujo para el segundo nivel de alarma. El resto de sub-diagramas no se describirán ya que siguen el mismo flujo de información desarrollado para el primer nivel de alarma, los cuales se han descrito en la subsección anterior.

4.4.2.1 Almacenamiento de vector de datos por día

En el primer sub-proceso, ver figura 4.24, se generan los datos de interés almacenándose en un archivo correspondiente a ese día. Al comienzo del siguiente día, se crea un archivo nuevo repitiéndose el proceso día con día.

Para el caso de los sensores de deformación, el proceso comienza registrando el valor de la deformación en un instante de tiempo, posteriormente a la señal adquirida se le quita el offset provocado por efecto térmico, con ello únicamente se observan efectos de tensión y compresión por carga viva, a continuación el proceso se sub-divide en dos partes. La primera atiende las deformaciones a tensión registradas por los sensores. La segunda se enfoca a almacenar los datos de las deformaciones a compresión. Para ambas partes se almacenan de manera independiente los datos obtenidos durante ese día.

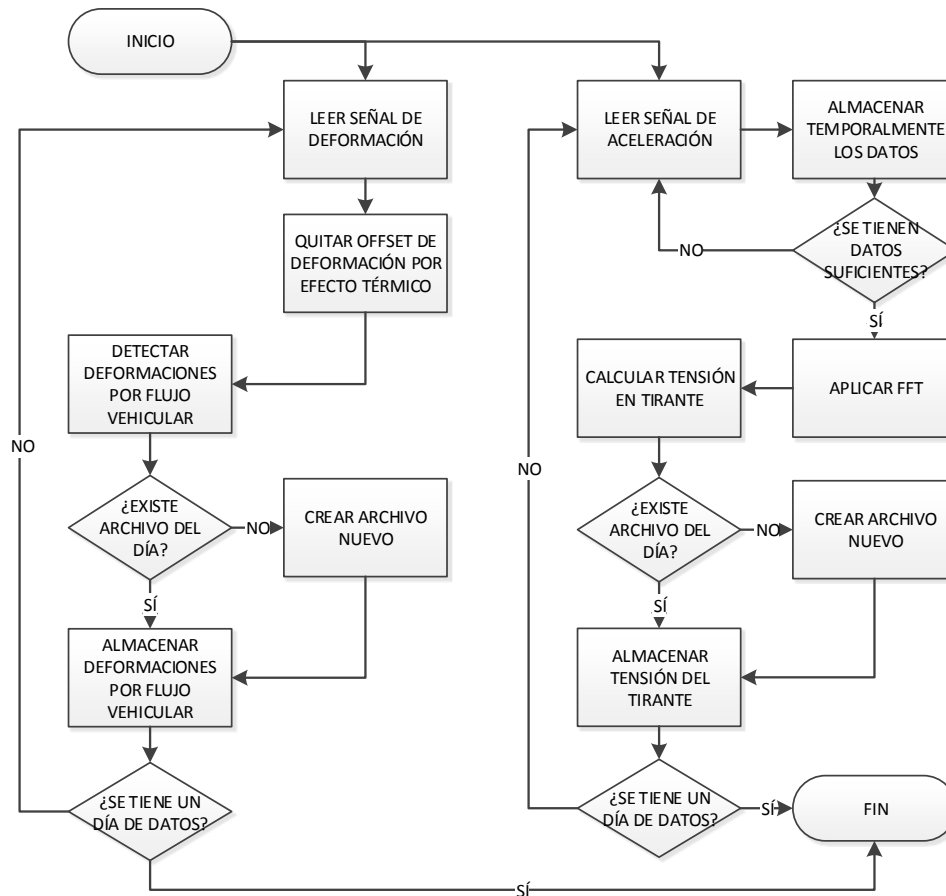


Figura 4.24. Diagrama para almacenar vector de datos por día.

Para los sensores de aceleración la señal que registran se convierte a frecuencia mediante la aplicación de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) a un conjunto de datos de aceleración, posteriormente se calcula la tensión axial en el tirante almacenando el valor obtenido en un archivo correspondiente al día de monitoreo. Al comienzo del siguiente día se crea otro archivo para almacenar los datos que se registren durante ese día, repitiéndose el proceso.

4.4.2.2 Ajuste de distribución estadística

Para cada sensor se generó un vector de datos por día, al acumular 15 días se introduce en el software adecuado para realizar el ajuste de distribución. En el mismo, se habilitan la capacidad de ajustar los datos de entrada por lo menos a 10 funciones de distribución comúnmente empleadas, las cuales son: normal, normal logarítmica, valores extremos, gaussiana inversa, gama, logística, logística logarítmica, Weibull, Pearson5 y Beta general. Enseguida se realiza el ajuste y se ordenan las funciones de la que presente menor a mayor error chi-cuadrado. En el caso de que los datos de entrada no se ajusten a la función elegida, se almacenará: nombre, posición respecto al menor error chi-cuadrado, cantidad de datos de entrada, valor de la media y desviación estándar de cada una de las funciones a las que se ajustó. Se almacenará la misma información de la función elegida sólo cuando los datos de entrada se ajusten a ésta. La figura 4.25 muestra el diagrama de flujo del sub-proceso.

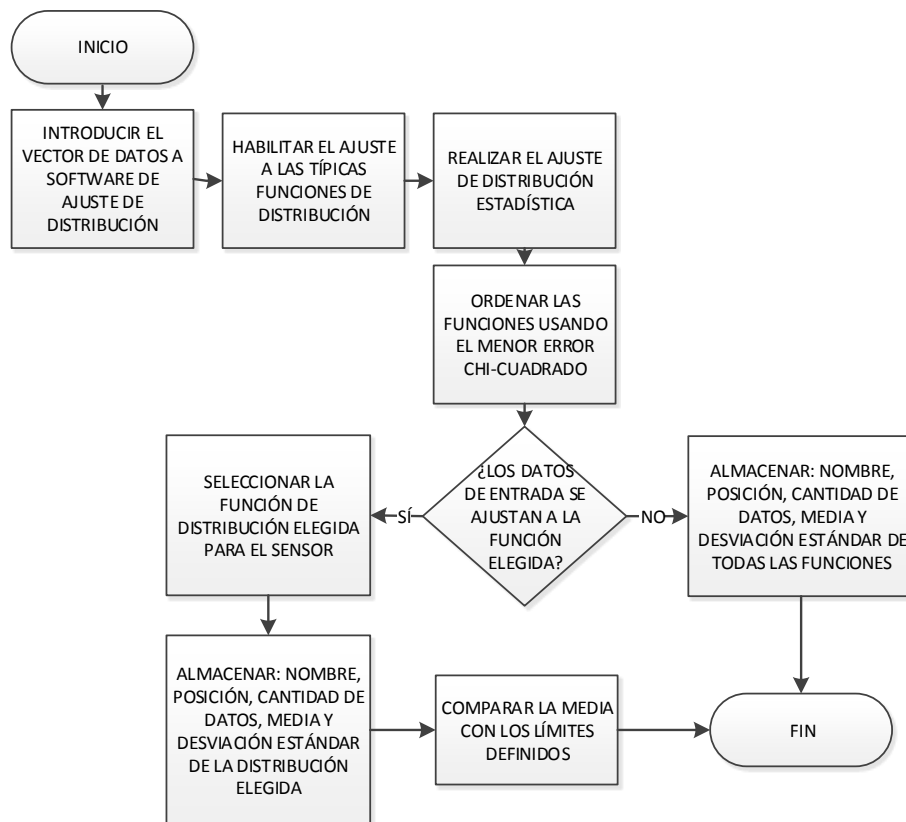


Figura 4.25 Diagrama para realizar ajuste de distribución.

4.5 Elección de la plataforma de programación

En esta etapa de la metodología se elige la plataforma de desarrollo para programar el Sistema Inteligente de Monitoreo. Los criterios de decisión están basados en la experiencia propia en lenguajes de programación empleados en otros proyectos. Con ellos se generan nueve características o parámetros que el

Sistema Inteligente de Monitoreo debe satisfacer. Los primeros seis criterios ayudarán a gestionar de mejor manera desde el proceso de adquisición de datos hasta el sub-procesamiento y almacenamiento de la información, mientras que los últimos tres servirán para agilizar el proceso de programación.

Se eligieron tres lenguajes de programación, los cuales son: Java, Visual Studio y LabVIEW. La preponderancia para cada criterio está definida por los siguientes valores:

- a) Malo
- b) Regular
- c) Bueno

Cada criterio se valora y los puntos obtenidos de cada uno se suman con respecto a la plataforma de desarrollo. A continuación, se plasman en la tabla 4.14 los criterios de mayor relevancia para agilizar el proceso de programación de la plataforma de desarrollo a elegir. En la primera columna se muestran los criterios seleccionados mientras que, en la segunda, el valor global del criterio.

Tabla 4.14 Criterios para agilizar el proceso de programación de la plataforma de desarrollo.

Criterio	Valor	Desarrollador					
		Oracle		Microsoft		National Instruments	
		Java 8	Puntos	Visual Studio 2010	Puntos	LabVIEW 2012	Puntos
Licencia	---	Libre	---	Sí	---	Sí	---
Tiempo de desarrollo	10	1	10	2	20	3	30
Familiarización con lenguaje de programación	5	2	10	1	5	3	15
		Total	20	Total	25	Total	45

En la tabla 4.15 se muestran los criterios relacionados con la mejor gestión de la información de la plataforma de desarrollo a emplear.

Tabla 4.15. Criterios para mejorar la gestión de información de la plataforma de desarrollo.

Criterio	Valor	Desarrollador					
		Oracle		Microsoft		National Instruments	
		Java 8	Puntos	Visual Studio 2010	Puntos	LabVIEW 2012	Puntos
Consumo de memoria RAM	5	3	15	1	5	2	10
Consumo de disco duro	5	3	15	1	5	2	10
Consumo de procesador	5	3	15	1	5	2	10
Visualización (gráficos)	5	1	5	3	15	2	10
Generación de reportes	5	1	5	3	15	2	10
Comunicación con hardware (Ethernet, Serial)	10	2	20	1	10	3	30
		Total	75	Total	55	Total	80

En seguida se suman los totales de cada una de las tres opciones de las tablas 4.14 y 4.15, dando los siguientes resultados.

- Java 8: 95 puntos.
- Visual Studio 2010: 80 puntos.
- LabVIEW 2012: 125 puntos.

Finalmente se decide emplear en el proyecto la plataforma de desarrollo LabVIEW 2012 al obtener la mayor puntuación.

4.6 Programación y calibración del sistema inteligente de monitoreo

Esta etapa contempla el desarrollo del Sistema Inteligente de Monitoreo desde el punto de vista de programación. Por tal razón, es la etapa a la cual se le dedicó mayor tiempo.

Después de haber decidido utilizar la plataforma de programación LabVIEW del desarrollador *National Instruments* para crear el Sistema Inteligente de Monitoreo

se comenzaron las actividades relacionadas a la programación de los protocolos de actuación inherentes al SIM.

Inicialmente se pretendía emplear los datos recogidos por el monitoreo en tiempo real para ejecutar los programas que se fueran desarrollando, pero al no contar con ellos debido a las deficiencias de los sistemas de comunicaciones, entiéndase módem 3G y antena satelital, se planteó emular el monitoreo remoto a través del uso de los datos registrados de meses anteriores, recopilados de la computadora del puente y almacenados en un disco duro portátil.

4.6.1 Emulación de la adquisición de datos de los extensómetros instalados en el puente Río Papaloapan

4.6.1.1 Interpretación de archivo de datos

Se implementó un módulo para extraer los datos de los archivos de dos minutos de información que se generan en el puente Río Papaloapan. Por tal razón, se requirió decodificar los archivos ya generados. Los archivos se almacenan de manera jerárquica en el disco duro de la PC, ubicada en el puente, en la siguiente ruta:

Mis documentos\Enlight\Data\Año\Mes\Sensors.AAAAMMDDhhmmss.txt

A continuación, se detalla en la tabla 4.16 la nomenclatura de los archivos generados por el sistema de adquisición de datos, se muestra como ejemplo el archivo Sensors.20150412171519.txt.

Tabla 4.16 Nomenclatura de los archivos generados en la adquisición de datos.

	Tipo	Fecha			Tiempo			Extensión
Nomenclatura	Sensors.	Año	Mes	Día	Hora	Minuto	Segundo	.txt
Ejemplo	Sensors.	2015	04	12	17	15	19	.txt

En la tabla 4.17 se muestra en detalle la descripción de cada una de las carpetas y archivo descritos en la ruta antes mencionada.

Tabla 4.17 Detalle de los elementos que conforman la ruta de los archivos de datos.

Información creada por	Tipo	Nombre	Descripción
Microsoft	Carpeta	Mis documentos	Ubicación unificada para almacenar datos de carácter personal.
		Enlight	Ubicación para almacenar las configuraciones y datos del sistema de adquisición.
Micron Optics	Carpeta	Data	Ubicación para almacenar los datos del sistema de adquisición.
		Año (4 dígitos)	Ubicación para almacenar los datos de un año en específico.
	Mes (2 dígitos)	Ubicación para almacenar los datos de un mes en específico.	
	Fichero	Sensors.AAAAMMDDhhmmss.txt	Archivo con los datos adquiridos durante 2 minutos.

La información que contiene el archivo se encuentra codificada como archivo de texto delimitado por tabulador, en donde, el primer renglón (encabezado) está formando por el tiempo y nombre de cada sensor, y el resto de renglones corresponden a los valores de la magnitud medida por cada sensor durante dos minutos de adquisición continua. En otras palabras, cada archivo contiene 63 columnas y 15001 renglones, equivalentes a 120 segundos de información a una frecuencia de muestreo de 125 Hz. Cabe mencionar que los valores de las magnitudes registradas se almacenan con 3 decimales. Con esto, el tamaño del fichero de 2 minutos de adquisición es de 6.60 MB.

En la tabla 4.18 se describe cómo se encuentra conformado el encabezado de un archivo generado durante la adquisición de datos en el puente Río Papaloapan. Se observa que la primera columna del archivo representa el tiempo de adquisición, medido en segundos. Cabe mencionar que las columnas que interesan en esta parte del proyecto, son de la columna 1 hasta la 25, y representan a los 24 sensores de deformación instalados en el puente.

Tabla 4.18 Encabezado de los archivos generados por el sistema de adquisición de datos.

Columna	0	1-25	26-30	31-54	55-62	63
Nombre	Time	STRAIN	TEMP	ACCEL	TILT	DISP
Instrumento	Reloj de interrogador	Extensómetro	Termómetro	Acelerómetro	Inclinómetro	Desplazamiento
Magnitud	Tiempo	Deformación	Temperatura	Aceleración	Ángulo	Desplazamiento
Unidad	segundos	µm/m	°C	g (9.81m/s ²)	grados	mm

Ya que se han interpretado la ruta de almacenamiento de los datos, la nomenclatura de los archivos y el contenido de cada uno de ellos, se prosigue con el desarrollo de un módulo que procesa cada uno de los archivos generados

durante el monitoreo para, de esta manera, emular el sistema de adquisición de datos y con ello comenzar el desarrollo de módulos de análisis que permitan interpretar la información del monitoreo en tiempo real. Por el momento se enfocará el desarrollo en un módulo que analice la información proveniente de los sensores de deformación, para después aplicar el mismo proceso para los diferentes tipos de sensores instalados en el puente.

4.6.1.2 Desarrollo del programa para emular la adquisición de datos

Con el conocimiento previo se comenzó a desarrollar el programa para emular los datos del puente.

Primero se desarrolló un sub-módulo cuyo fin es leer únicamente los archivos que contienen datos dentro de la carpeta del mes de interés, esto debido a que el sistema de adquisición en ocasiones crea archivos sin información de datos, solamente contienen el encabezado del archivo, mientras que en otras ocasiones los archivos se truncan sin llegar a formar los 2 minutos continuos de información.

El sub-módulo desarrollado se nombró “Elimina archivo pequeño”, en la figura 4.26 se observa una parte del código implementado, el cual compara el tamaño del archivo que se lee, si éste es menor de 5 MB, el archivo se elimina del disco duro, y por lo tanto no es empleado por el emulador, por consiguiente, tampoco empleado para un futuro análisis.

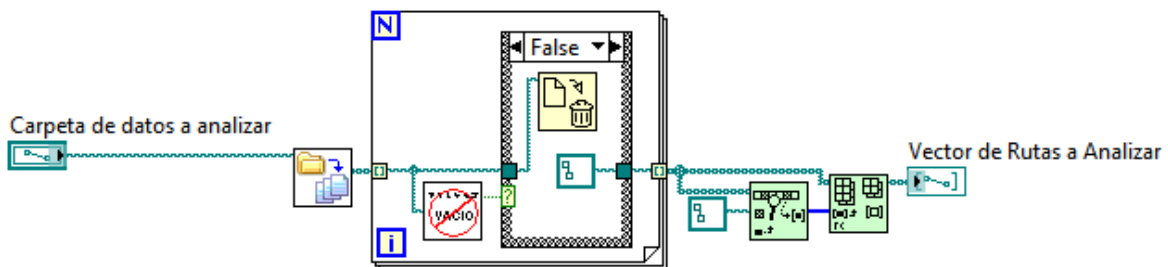


Figura 4.26 Código del sub-módulo “Elimina archivo pequeño”.

El siguiente sub-módulo nombrado “Leer datos de archivo” se encarga de extraer: el valor del tiempo inicial del archivo que se está procesando; los nombres de los sensores, en un vector, y los valores de los sensores monitoreados, estos últimos se extraen en una matriz de 15000 renglones x 62 columnas, ver figura 4.27.

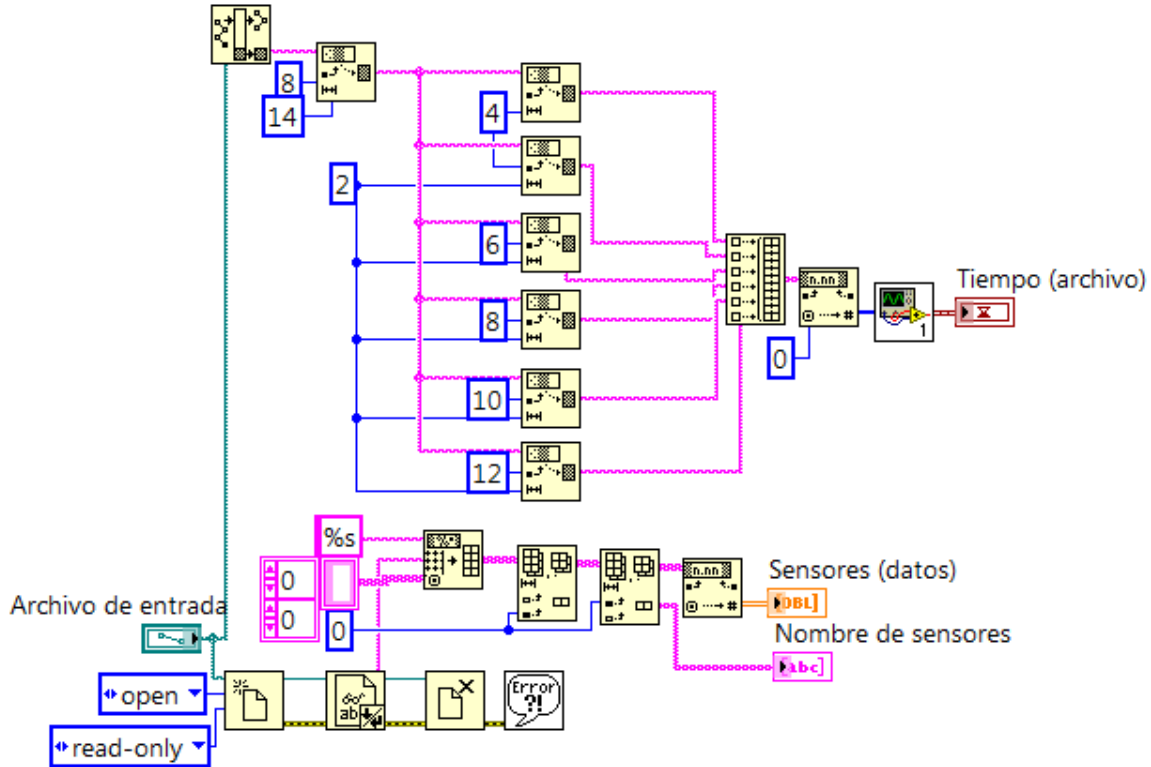


Figura 4.27 Código del sub-módulo “Leer datos de archivo”.

Cada uno de los 15000 renglones corresponde a un vector de datos, en donde cada vector está constituido por el tiempo y el resto de los valores corresponden a las magnitudes de los 62 sensores instalados en el puente, tal como se ha ilustrado en la tabla 4.17.

A continuación se describe el proceso que el sub-módulo sigue para obtener la información de los sensores.

- La información correspondiente al tiempo inicial se obtiene mediante la decodificación del nombre del archivo, con base en la nomenclatura mostrada en la tabla 4.17.
- Los nombres de los 62 sensores se obtienen al leer el primer renglón del archivo y omitir el primer elemento del renglón, el cual corresponde al tiempo, tal como se muestra en la tabla 4.18.
- Los valores de las magnitudes de los 62 instrumentos se obtienen al descartar la primera columna, el tiempo, y el primer renglón del archivo, asociado a los nombres de los archivos.

El siguiente sub-módulo llamado “Extractor de datos” toma la información correspondiente a los extensómetros; tanto el vector de nombre de los sensores, como la matriz de valores de deformación, esto se debe a que por el momento

estos sensores son los que interesa analizar. En la figura 4.28 se muestra el código del programa el cual extrae únicamente los primeros 24 elementos correspondientes a los extensómetros de la matriz principal de datos, junto con sus respectivos nombres de identificación, ya que por el momento se pretende trabajar con el análisis de los sensores de deformación, por lo cual el resto de datos relacionados a otros tipos de sensores se omiten.

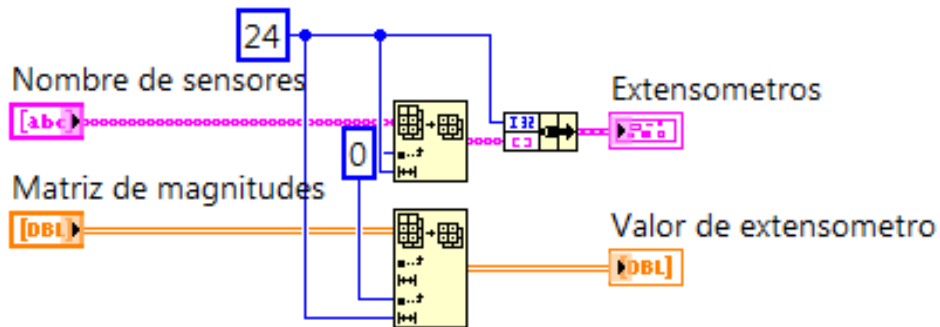


Figura 4.28. Código del sub-módulo “Extractor de datos”.

Por último, mediante la integración de los sub-módulos ya mencionados se emulan los valores de las magnitudes medidas en el puente Río Papaloapan, y con ello es posible implementar las acciones que el SIM realizará de manera autónoma. A continuación, se describe de manera general la parte del programa que emula la adquisición de datos del puente:

Por cada archivo de dos minutos se generan 15000 iteraciones, en la primera iteración se muestran los valores de los 24 extensómetros obtenidos durante el primer periodo de muestreo del archivo, adicional, se incrementa el tiempo añadiendo 8 ms (periodo de muestreo) al valor del tiempo inicial para emular la adquisición de datos a 125 Hz. Este proceso se repite de manera sistemática hasta llegar a la última iteración, la cual corresponde al último renglón del archivo que se está leyendo. En la siguiente iteración se decodifica el siguiente archivo de dos minutos repitiéndose el proceso hasta concluir con los archivos almacenados en la carpeta correspondiente al mes que se analiza.

4.6.2 Pre-procesamiento: Filtro pasa banda

Se ha observado que la señal de los extensómetros empleados en la instrumentación contiene datos indeseados, en otras palabras, posee ruido, generado por el mismo sistema de adquisición de datos óptico (interrogador) o debido a la tecnología de los transductores (rejillas de Bragg), lo que ocasiona que las señales que se desean comparar con los límites normales de operación no sean confiables tal y como se leen, especialmente en el caso de algunos extensómetros en los que sus límites de operación normal quedan dentro del umbral de ruido. Por tal razón, es necesario emplear un algoritmo que elimine el ruido indeseado de la señal adquirida en tiempo real para cada sensor de deformación.

A continuación se describen los criterios que se emplean para elegir el filtro debido a las necesidades del mismo proyecto:

- Permita adquisición en tiempo real.
- Menor tiempo de procesamiento de datos por la PC.
- Menor error en amplitud entre la señal obtenida del filtro y la señal monitoreada.
- Menor tiempo de retardo de la señal obtenida del filtro y la señal monitoreada.

Ya que se desea que el SIM trabaje con señales en tiempo real, es necesario emplear un filtro que realice análisis punto por punto.

Las ventajas de emplear un análisis punto por punto son:

- Seguimiento y respuesta a eventos en tiempo real.
- El proceso del análisis es dedicado directamente a la señal recibida incrementando la velocidad de ejecución y reduciendo las pérdidas de información.
- Se sincroniza el análisis automáticamente con la adquisición de datos, debido a que se trabaja con una señal instantánea.

Por lo tanto, se decide emplear un VI de tipo Express llamado "Filter", que analiza punto por punto la señal de deformación, la ventaja principal de este VI es que permite filtrar un conjunto de señales de manera simultánea, reduciendo el tiempo de procesamiento de los datos. Dentro de las configuraciones del VI Filter se pueden modificar los parámetros del filtro. A continuación, se muestra en la tabla 4.19 cada uno de los parámetros con su respectiva elección.

Tabla 4.19 Parámetros de configuración del VI Filter.

Parámetro	Descripción	Elección	Justificación
Modo	Tipo de comportamiento que tiene el filtro a una señal de impulso unitario, respecto al tiempo.	IIR Filter - Filtro de respuesta infinita al impulso	Permite emplear topologías de filtro predeterminadas, con características configurables y obtener señales de las mismas características de un FIR pero con menor orden del filtro (menor tiempo de procesamiento).
Tipo	Característica del filtro que permite elegir la configuración de la o las frecuencias de corte.	Pasa banda	Se desean omitir señales indeseadas tanto en frecuencias bajas ocasionadas por la deriva térmica y frecuencias altas generadas por el interrogador o las rejillas de Bragg.
Topología	Tipo de filtro prediseñado para emplear sólo en filtros IIR.	Butterworth	La amplitud de la señal obtenida es igual a la señal de entrada solo se reduce drásticamente cerca de las frecuencias de corte.
Orden	Describe el grado de aceptación o rechazo por arriba o por debajo de la frecuencia de corte.	2do	Consume 4.13% más de tiempo que una señal de 1er orden pero la amplitud es 99% similar a la señal original, mientras que la de primer orden es 96% similar. Por cada orden que se incrementa el filtro, aumenta el tiempo de procesamiento en la PC.
Frecuencia de corte (Hz)	La frecuencia de la cual el nivel de salida se reduce por un factor de "raíz de dos entre dos".	Fc(baja): 0.010	Permite incluir en el análisis cambios de deformación lentos - hasta de 100 segundos de periodo.
		Fc(alta): 1.500	Permite incluir en el análisis cambios de deformación rápidos - hasta de 0.667 segundos de periodo.
Cantidad de datos (n)	Tamaño de la porción de la señal de deformación generada por el paso del vehículo más lento.	5000	Equivale a un cambio de deformación que tiene una duración de 40 segundos, generado por el paso de un vehículo pesado a muy baja velocidad.

4.6.2.1 Adecuar información adquirida

Debido a que se eligió emplear el VI Express - Filter, con los parámetros antes mencionados, es necesario adecuar las señales de entrada ya que este VI sólo permite datos de tipo *waveform*, con n cantidad de elementos por cada extensómetro, mientras que los obtenidos por el sistema de adquisición de datos solo entrega un único elemento de tipo numérico de cada extensómetro por cada muestreo. Además, se desean analizar de manera simultánea los 24 extensómetros con el mismo filtro.

Con la información anterior se desarrolló un sub-módulo que crea un arreglo móvil por cada extensómetro, con cantidad de datos inicial $n = 1$, incrementándose en

un elemento por cada muestra adquirida, hasta alcanzar $n = 5000$, manteniendo ese mismo tamaño de datos en todo momento. Adicional, al vector de n elementos se le quita la señal de offset en deformación generado por carga estática y se le agrega el periodo de adquisición de datos, en segundos; para convertir los datos a tipo *waveform*. Este proceso se repite por cada extensómetro y con ello se forma un arreglo de señales que, posteriormente, el VI Express “Filter” procesará de manera simultánea aplicando el filtro a todos los extensómetros. En la figura 4.29 se ilustra el código desarrollado, el cual crea un arreglo temporal móvil de 5000 elementos, a esos datos les quita el offset y convierte el tipo de dato numérico obtenido a tipo *waveform*, para cada uno de los sensores de deformación monitoreados en el puente. Lo anterior con el fin de adecuar el tipo de dato antes de ser filtrada las señales por el VI Filter.

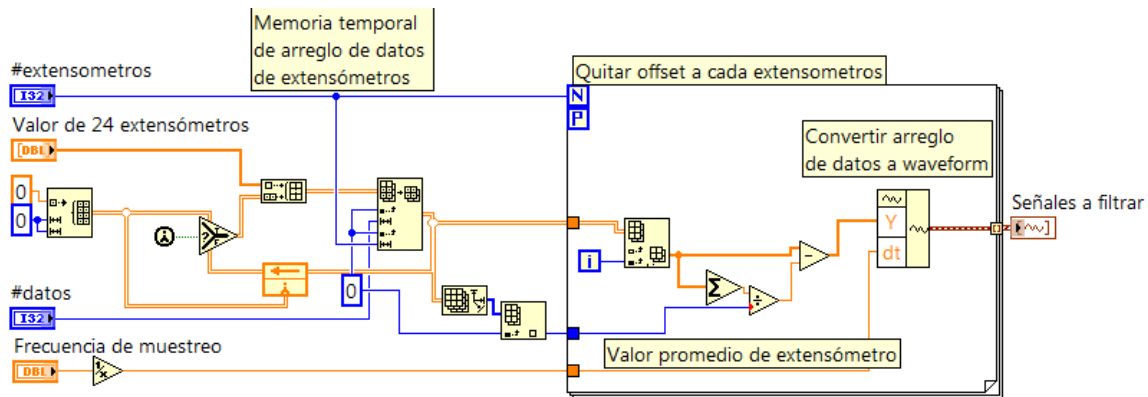


Figura 4.29. Código del sub-módulo “Arreglo2Dmóvil”.

4.6.2.2 Implementación y optimización de filtro a señal de sensores de deformación

Enseguida se aplicó el filtro a los datos de los sensores de deformación, la información obtenida ayudó a comparar los diferentes filtros generados a través de las modificaciones de los parámetros del mismo. En la figura 4.30 se muestra el código del módulo que filtra la señal de los sensores de deformación, el módulo se implementó a través de 3 VI's, el primero adecua la información para ser procesada por el siguiente VI; el segundo aplica el filtro a los sensores de deformación de manera simultánea; el último VI adecua el tipo de datos de la señal filtrada para ser interpretada por el resto de los módulos subsiguientes.

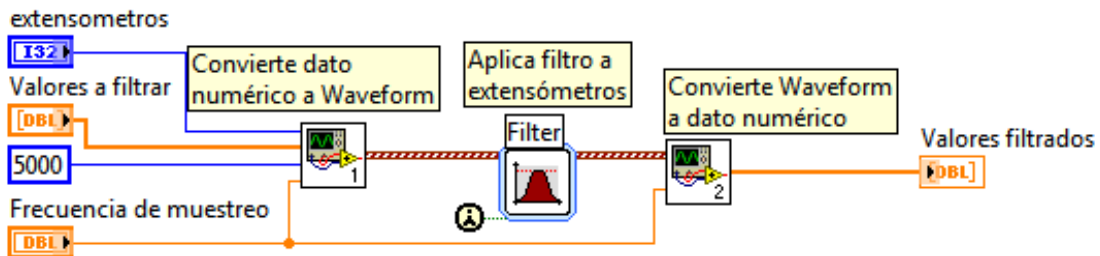


Figura 4.30 Código del módulo “Filtro arreglo 1D”.

Al comenzar a configurar el filtro en las señales de los sensores de deformación, se decidió que la topología a emplear sería *Butterworth*, ya que mantiene la amplitud de la señal de salida muy similar en amplitud a la señal muestreada.

Para optimizar el tiempo de procesamiento en la PC se comenzó a modificar el orden del filtro. Con lo anterior se realizaron pruebas de desempeño con filtros de primero, segundo y cuarto orden.

Las características de las pruebas fueron las mismas excepto el orden del filtro, el cual se configura en el menú del VI Express "Filter". Para esto se empleó el siguiente equipo de cómputo: Dell Precision, modelo T3500; procesador Intel Xeon E5630 a 2.53 GHz; 12 GB en RAM. El archivo que se empleó para realizar las pruebas se eligió de manera aleatoria: Sensors.20141101005825.txt

En la tabla 4.20 se muestran los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a los filtros implementados con diferente orden. Es importante destacar el incremento del tiempo cuando aumenta el orden del filtro, mientras más tiempo de procesamiento tome este módulo, la carga computacional se incrementa. Lo que se desea es que el tiempo de procesamiento sea el menor posible sin sacrificar la similitud de la amplitud de deformación.

Tabla 4.20 Resultados del desempeño en tiempo entre filtros de diferentes órdenes.

Orden del filtro	Tiempo de procesamiento x muestreo (s)	Tiempo de procesamiento x archivo 2 min (s)	Incremento de tiempo respecto a filtro 1er orden (%)
1er	0.00242	36.3	0.00
2do	0.00252	37.8	4.13
4to	0.00388	58.2	60.33

En la figura 4.31 se visualizan 16 segundos de monitoreo en el sensor L10, instalado en la cara interna de la pila 2 aguas arriba, al transitar un transporte de carga.

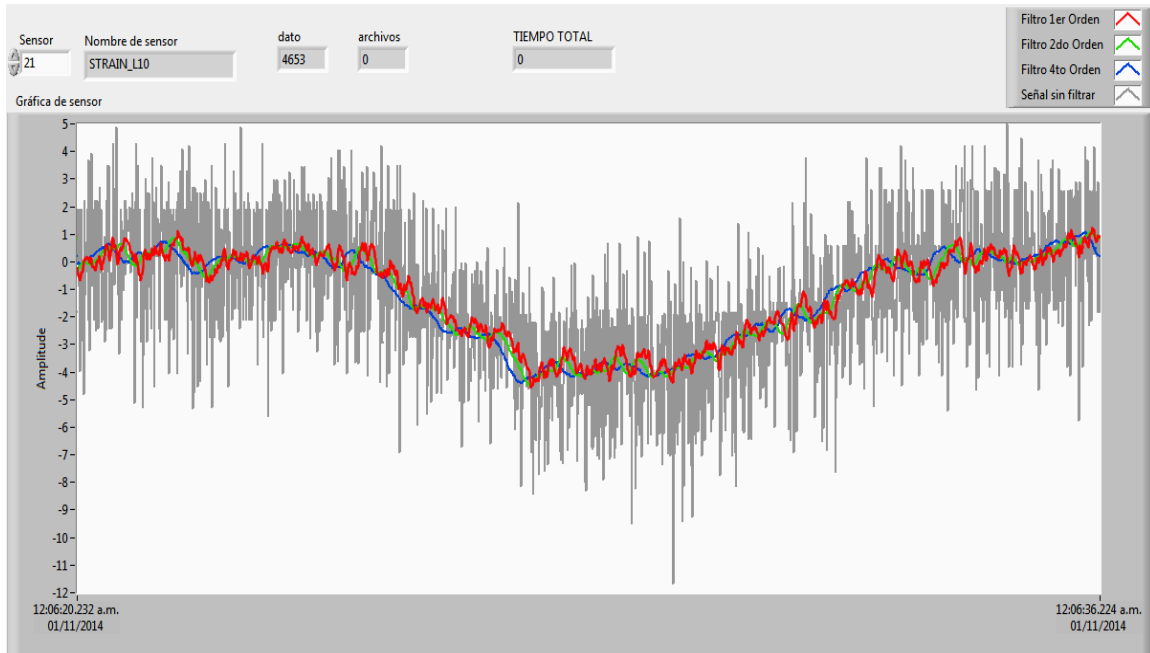


Figura 4.31 Comparativa de filtros de diferentes órdenes en sensor de deformación L10.

En la imagen se muestran: la señal original (color gris) obtenida del monitoreo al registrar una deformación longitudinal con orientación respecto a la altura de la pila; la señal del filtro de primer orden (color rojo); la señal del filtro de segundo orden (color verde) y la señal del filtro de cuarto orden (color azul).

De lo anterior se decidió emplear un filtro de segundo orden. Posteriormente se definieron el resto de parámetros de configuración del filtro. Para esto se realizaron pruebas para comparar el desempeño de 6 diferentes filtros, modificando el número de datos n y la frecuencia de corte baja f_c . Con el resultado de las pruebas se calculó el error relativo porcentual, obtenido mediante la ecuación (4.2) de las mediciones obtenidas en un par de sensores de deformación ante la misma carga dinámica provocada por el paso de un tractocamión.

$$E_{rel} (\%) = \left(\frac{S_f - S_o}{S_o} \right) \times 100 \quad (4.2)$$

En donde:

E_{rel} : Error relativo porcentual

S_o : Señal original

S_f : Señal filtrada

Se describen en la tabla 4.21 las características de cada uno de los seis filtros empleados, como se ha mencionado ya se han definido parámetros del filtro como: tipo, topología, orden y frecuencia de corte alta; por lo cual permanecen constantes. Sólo se modifican el número de datos a filtrar, el cual está relacionado a través de la frecuencia de muestro con el tiempo que permanece una señal de deformación causada por el paso de una carga sobre la zona donde se encuentra instalado el sensor. Además de la frecuencia de corte baja que se relaciona con la velocidad más baja que pasan los vehículos en la zona instrumentada.

Tabla 4.21 Características de los filtros empleados para comparar desempeño.

Filtro	Cantidad de datos (<i>n</i>)	Tipo	Topología	Orden	Frecuencia de corte	
					Baja (Hz)	Alta (Hz)
Tipo 1	1250	Pasa banda	Butterworth	2	0.005	1.5
Tipo 2	2500	Pasa banda	Butterworth	2	0.005	1.5
Tipo 3	5000	Pasa banda	Butterworth	2	0.005	1.5
Tipo 4	1250	Pasa banda	Butterworth	2	0.010	1.5
Tipo 5	2500	Pasa banda	Butterworth	2	0.010	1.5
Tipo 6	5000	Pasa banda	Butterworth	2	0.010	1.5

En la tabla 4.22 se muestran los resultados de la implementación de cada uno de los seis filtros en dos sensores de deformación instalados en la zona aguas abajo ante la misma carga, para comparar los resultados se emplea el error relativo porcentual de las amplitudes registradas. Se eligieron los sensores L1 y L7 ya que la amplitud de deformación del primero es la más pequeña que se registra cuando pasa un vehículo pesado, mientras que la amplitud del L7 es la más grande.

Tabla 4.22 Error relativo porcentual de los filtros evaluados en los sensores L1 y L7.

Filtro	EXT-L1 (Deformación pequeña)		EXT-L7 (Deformación grande)	
	Tensión	Compresión	Tensión	Compresión
Tipo 1	2.43%	-23.33%	-8.41%	58.18%
Tipo 2	3.07%	-11.05%	-3.22%	15.46%
Tipo 3	-0.19%	-1.81%	-3.03%	4.97%
Tipo 4	1.08%	-22.33%	-9.63%	55.81%
Tipo 5	1.72%	-12.04%	-4.51%	13.69%
Tipo 6	-1.50%	-2.89%	-4.32%	6.29%

De lo anterior se decide emplear el filtro tipo 3 para configurar los parámetros del VI Filter para las señales de los sensores de deformación. Los parámetros elegidos ya se han mostrados en la tabla 4.19. Hasta el momento se ha emulado el comportamiento de los sensores en las instalaciones del IMT, también se desarrolló un módulo para eliminar las señales indeseadas en los datos de los sensores de deformación, para lograrlo se configuraron adecuadamente los parámetros del filtro a través de pruebas de desempeño, empleando como criterios de aceptación el tiempo de procesamiento y la amplitud de las deformaciones de las señales filtradas.

Lo siguiente es desarrollar un módulo que compare la señal registrada por cada sensor de deformación con sus respectivos límites de operación normal para determinar cuándo ocurre un evento extraordinario en el puente y así ejecutar el protocolo de actuación correspondiente al evento.

4.6.3 Determinación de evento extraordinario en los sensores de deformación para el primer nivel de alarma

Ya que se han definido los valores de los parámetros del filtro para eliminar las señales indeseadas que se registran de los sensores de deformación, es necesario implementar un módulo que compare las señales filtradas de los sensores con los límites de operación normal de cada sensor.

Este módulo del SIM se enfocará al proceso del primer nivel de alarma generado por los sensores de deformación. Este primer nivel se activa cuando uno o más de los 24 extensómetros instalados en el puente sobrepasan sus límites normales de operación por cargas dinámicas, tanto para deformaciones a tensión como a compresión.

Recordando, los límites de operación normal se definieron a partir de ± 2.5 desviaciones estándar del valor de la media anual, obtenida a partir de ajustes de distribuciones estadísticas de la información seccionada en bloques de 15 días de las cargas dinámicas causadas por el flujo vehicular, ver tablas 4.5 y 4.6. Para ser más precisos, para un extensómetro el límite de deformación a tensión será la media anual de las deformaciones positivas $+2.5\sigma$ obtenido del promedio de desviaciones estándar de los ajustes de distribución por deformaciones positivas, mientras que el límite de deformación a compresión será la media anual de las deformaciones negativas -2.5σ obtenido del promedio de desviaciones estándar de los ajustes de distribución por deformaciones negativas.

4.6.4 Comparar señal filtrada de sensores de deformación contra los límites de operación normal

El sistema de adquisición de datos de fibra óptica registra los datos de los sensores de deformación a una frecuencia de 125 Hz, este vector contiene 24 elementos que corresponden a los sensores de deformación. Cabe mencionar que en tiempo real se filtra la señal de cada vector de datos. Para determinar cuándo existe un evento extraordinario es importante comparar cada una de las 24 señales filtradas, correspondientes a cada sensor de deformación, contra sus respectivos límites de operación normal. Para determinar cuándo se presenta un evento extraordinario se desarrolló el módulo “Evento extraordinario”, ver figura 4.32.

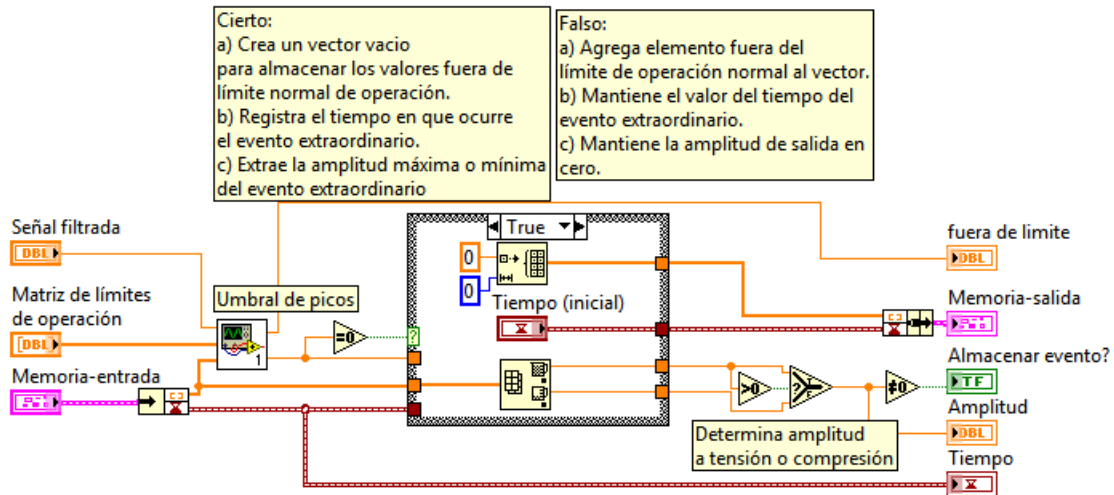


Figura 4.32 Módulo “Evento extraordinario”.

Cuando se registran valores fuera del límite de operación normal se almacenan éstos en un vector de datos, inmediatamente después de que el valor de deformación vuelve dentro de los límites normales de operación se registra el valor del tiempo actual, se obtiene la amplitud máxima en deformaciones a tensión o mínima en deformaciones a compresión y, por último, se genera una alarma indicando que ocurrió un evento extraordinario.

Para determinar la amplitud de la deformación ocurrida del módulo mencionado anteriormente, se desarrolló un sub-módulo nombrado “Umbral de picos”, ver figura 4.33, el cual extrae los límites de operación normal de cada sensor de deformación, tanto deformaciones a tensión como a compresión.

Este módulo compara el valor de la señal filtrada de deformación con cada límite, mientras al detectar que el valor está fuera del límite de operación normal se almacena éste en un vector de memoria temporal; además, para evitar que se

registren varios picos relacionados al mismo evento se desarrolló un comparador con histéresis. Al detectar que un valor se encuentra fuera de los límites normales de operación se activa el comparador con histéresis hasta que el valor disminuye al 85% del límite calculado.

Comúnmente este fenómeno se presenta cuando pasan vehículos sobrecargados a muy baja velocidad ya que en ocasiones el valor registrado supera el límite normal de operación al pasar uno de sus ejes sobre el área en donde registra el sensor, posteriormente la deformación regresa a valores menores al límite, en seguida otro de los ejes del mismo transporte vuelve a superar dicho límite. Con esto se evitan dobles o hasta triples picos de deformación relacionados al mismo acontecimiento.

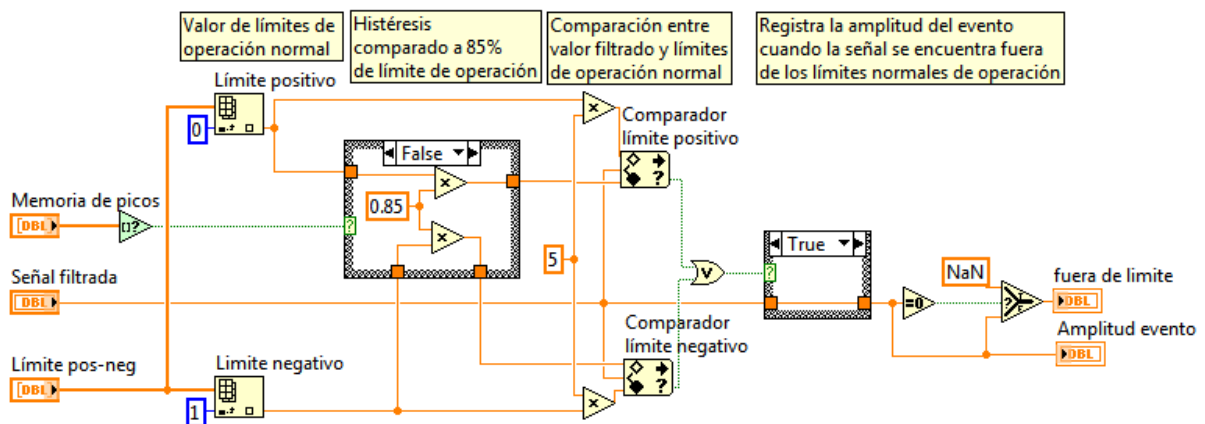


Figura 4.33 Sub-módulo “Umbral de picos”.

4.6.5 Almacenamiento de información de la alarma

Una vez que se tiene el tiempo, amplitud e indicador de que ocurrió un evento extraordinario, es necesario almacenar la información adecuada en el disco duro de la PC instalada en el puente, para posteriormente ser enviada al CMPEI. Primero se define la ruta en donde se almacenará el archivo. En este caso, se emplea la siguiente ruta:

Documentos\SIM\Datos\Eventosextraordinarios\Año\Mes\Día\ALARMA.AAAAMM DD.txt

En donde las carpetas Año, Mes, Día y el fichero en donde se almacenan las alarmas, se crean automáticamente dependiendo del valor del tiempo en que ocurre el evento extraordinario.

En la ruta asignada cuando ocurre un evento extraordinario se almacena un vector de datos respecto a la alarma registrada, tal como se muestra en la tabla 4.23. En donde se guarda la información de manera estructurada por cada alarma que ocurra en el mismo día.

Tabla 4.23 Registro de alarma en PC al ocurrir evento extraordinario.

Archivo	20150425135730.Evento.txt
Fecha	25/03/2015
Hora	13:57:30
Nivel	Primero
Tipo de sensor	Deformación
Sensor	STRAIN_L7
Amplitud	165.519

En la figura 4.34 se muestra el sub-módulo nombrado “Registro de alarma x día”, como su nombre lo indica, éste almacena un registro de los eventos extraordinarios ocurridos en cada día de monitoreo.

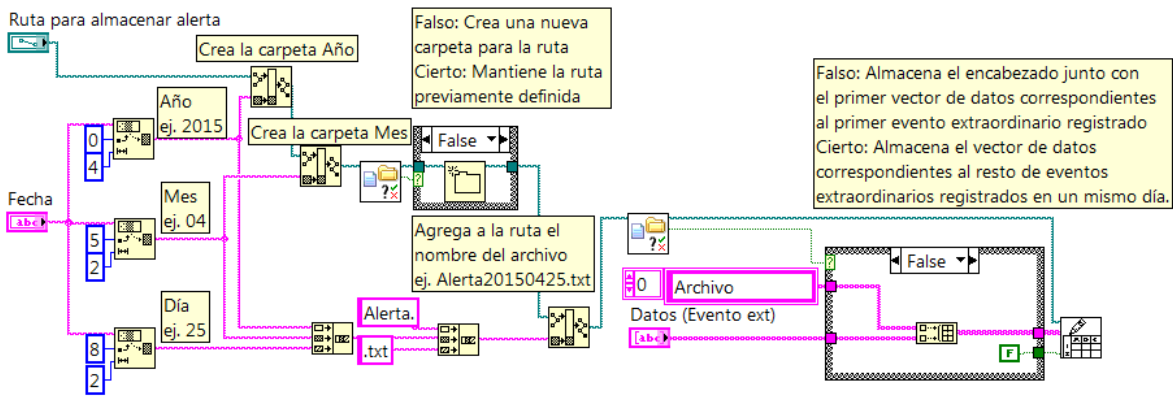


Figura 4.34 Módulo “Registro de alarma x día”.

Cabe mencionar que el nombre del archivo, primer elemento de la tabla 4.20, corresponde al archivo que se genera al almacenar un bloque de datos previos, en conjunto con un bloque de datos después al evento extraordinario.

4.6.6 Almacenamiento de datos del evento extraordinario registrados por los sensores de deformación

4.6.6.1 Almacenar bloque de datos previos a la alarma.

Dado que se desea conocer la condición estructural anterior al registro del evento extraordinario y la condición posterior a éste, se deben almacenar dos bloques de datos, uno previo y otro posterior al evento. Por lo cual se decidió almacenar un minuto de información antes y un minuto de información después de que ocurra el evento. El valor de un minuto se eligió debido a que un vehículo pesado transitando a una velocidad promedio de 25 km/h le toma cerca de 58 segundos

atravesar el puente en su totalidad. En la figura 4.35 se muestra el código correspondiente al módulo que almacena los datos previos y posteriores a que ocurre la alarma.

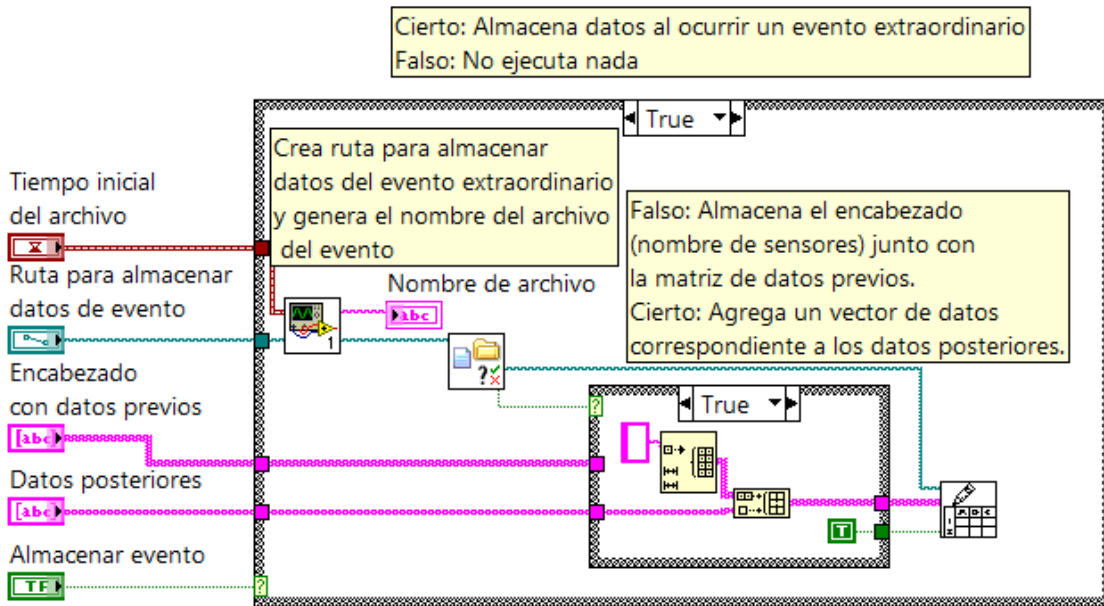


Figura 4.35 Módulo “Almacenar datos del evento”.

Se ilustra en la figura 4.36 el sub-módulo del código “Ruta para almacenar datos del evento”, la cual se encarga de crear la ruta para almacenar los datos de todos los sensores, tanto previos como posteriores al evento. La ruta se crea a partir del valor del tiempo registrado.

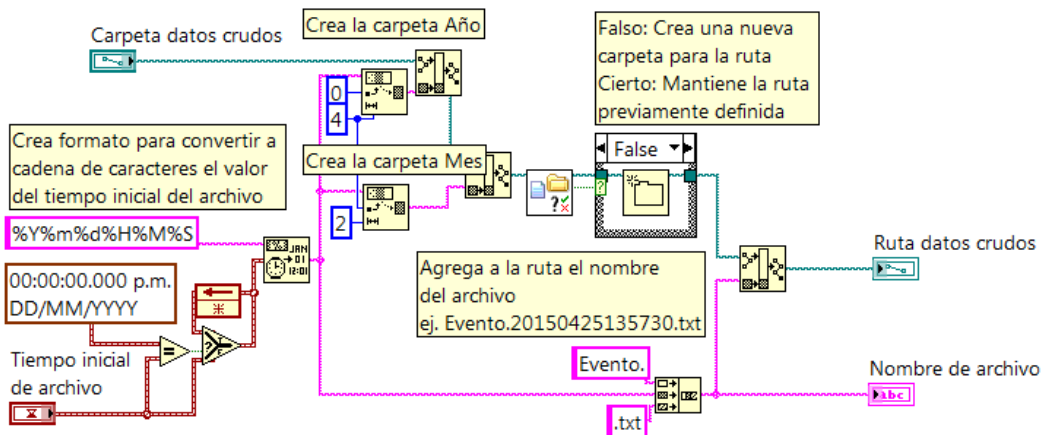


Figura 4.36 Sub-módulo “Ruta para almacenar datos del evento”.

Para lograr almacenar el buffer móvil de datos previos es necesario almacenar un vector de datos por cada muestreo en una matriz inicialmente vacía, el tamaño

asignado para la matriz es de 7500 valores, equivalentes a 60 segundos de datos muestreados a 125 Hz, para cada uno de los 61 sensores instalados en el puente. Cuando la matriz de datos se llena con 7500 vectores, el nuevo vector introducido desplaza el resto de vectores, causando la eliminación del primer vector introducido en la matriz. Conforme van llegando nuevos vectores, se van borrando de manera sistemática los primeros vectores de esta forma se crea un buffer de información móvil, que será vaciado (almacenado en disco duro), hasta que se detecte que ha ocurrido una alarma. Este buffer de información móvil será el minuto previo a que ocurra un evento extraordinario.

En la figura 4.37 se muestra el módulo “Almacenar datos previos”. Al detectarse un evento extraordinario y ya que el buffer de datos se encuentre lleno con el minuto previo de información se vaciará el buffer móvil y se obtendrá la fecha y hora inicial del evento detectado. Enseguida se guarda el encabezado del archivo que contiene el nombre de cada uno de los 61 sensores junto con los valores del buffer móvil, pero para ser almacenados los datos numéricos se convierten en cadena de caracteres con precisión de tres dígitos.

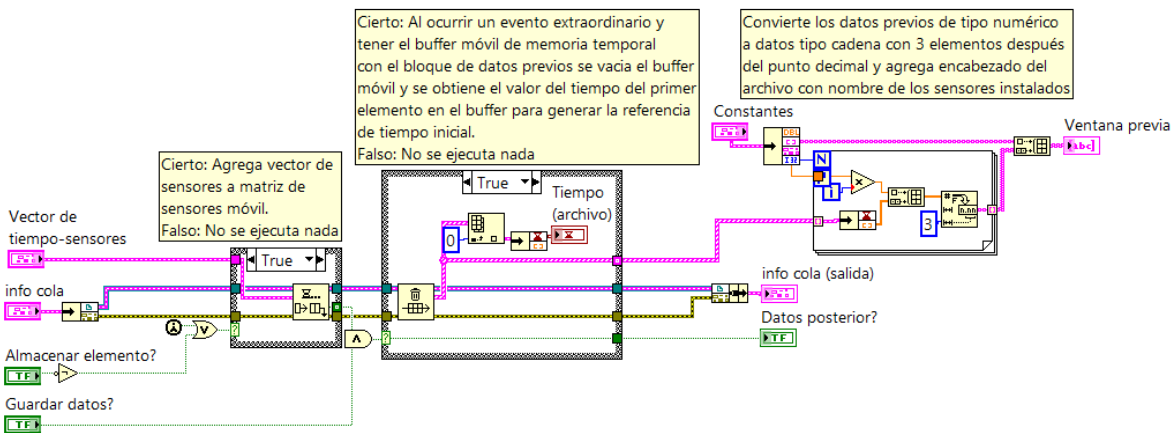


Figura 4.37. Sub-módulo “Almacenar datos previos”.

4.6.6.2 Almacenamiento de bloque de datos posteriores a la alarma

En el párrafo anterior se mostró el código y se explicó el almacenamiento de los datos previos al evento. Posteriormente, se desarrolló el código para almacenar el vector de datos posteriores a la alarma, después de ocurrido un evento extraordinario y vaciar el buffer de datos previos al disco duro de la PC, se comienzan a almacenar en el mismo archivo el vector de datos de los sensores monitoreados cada vez que se realiza un muestreo.

Iterando cada 8 milisegundos se continúan almacenando los datos hasta que se acumulan 7500 vectores posterior al evento extraordinario, equivalentes a 1 minuto de información después de ocurrido el evento.

En la figura 4.38 se muestra el código del sub-módulo nombrado “Almacenar datos posteriores”, en el cual se ilustra que únicamente se almacena información si ha ocurrido un evento y el contador de datos posteriores, CDP por sus siglas, es menor a la cantidad de datos posteriores definidos con anterioridad. Adicional se observa que también se incluye el incremento de tiempo en el vector de datos.

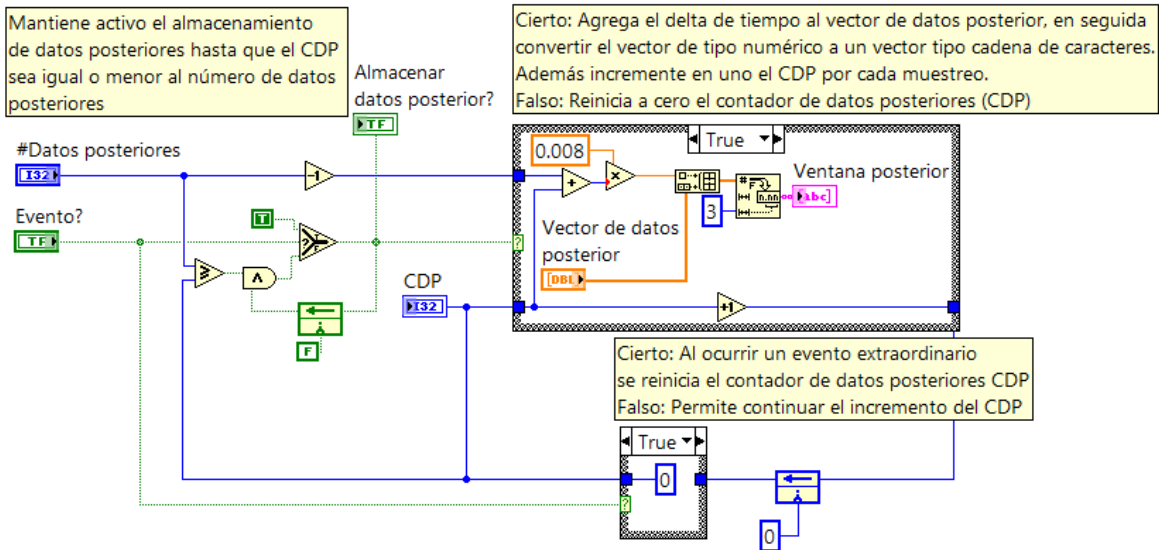


Figura 4.38 Sub-módulo “Almacenar datos posteriores”.

Hasta el momento se ha desarrollado el código para comparar la señal filtrada de los sensores de deformación con sus respectivos límites de operación normal para determinar en tiempo real cuando ocurra un evento extraordinario.

También, automáticamente, se registra en un archivo la alarma con los datos específicos del evento extraordinario como son el tipo de sensor, el nombre del sensor, la amplitud registrada, el momento en que ocurrió el evento y el nombre del archivo en donde se encuentra almacenado el bloque de 2 minutos de información de todos los sensores.

Por último, se implementó un código para almacenar los datos de información previos, durante y después de que ocurre un evento extraordinario, estos datos se almacenan en un archivo con nombre definido por el tiempo inicial del archivo, un minuto antes del evento extraordinario que, a su vez se almacena en carpetas generadas de manera automática dependiendo del año y mes en que se registre el evento.

4.6.7 Almacenamiento de video en un evento extraordinario registrado por los sensores de deformación

Hasta el momento se han logrado detectar eventos extraordinarios en los sensores de deformación, a través de la comparación entre las señales filtradas de los sensores y los límites normales de operación, esto ha permitido almacenar de manera automática bloques de datos previos, durante y después del evento.

A continuación se muestra el desarrollo del código para comunicar el servidor web (codificador Bosch VIP X1) y la PC a través de comunicación TCP. De esta manera, mediante la comunicación, se pueden recibir paquetes de video y almacenar éstos cuando se presente una alarma o se decida almacenar por algún otro motivo. También se ilustra el proceso para almacenar video previo y posterior a la alarma.

4.6.7.1 Establecimiento de comunicación entre el codificador Bosch VIP X1 y la PC.

El sistema de video instalado en el puente Río Papaloapan está conformado por dos cámaras de video marca Bosch modelo MIC400, ver figura 4.39, tipo PTZ lo que le confiere capacidad de moverse en dos ejes de rotación y además del zoom óptico de 36X. Cada cámara se instaló en cada una de las pilas en dirección aguas abajo a una altura de 20 m con respecto al tablero del puente.



Figura 4.39 Cámara Bosch PTZ MIC 400.

La alimentación, el control de la posición de la cámara y el video se transmiten de manera analógica mediante un cable especial armado por Bosch hacia la fuente de alimentación que, a su vez, sirve como concentrador unificado del cableado.

El video se transmite por medio de un cable coaxial con conectores BNC en formato NTSC. Para convertir el video analógico a señal digital se emplea un codificador Bosch modelo VIP X1, ver figura 4.40, que también puede ser empleado como servidor web de video.



Figura 4.40. Codificador Bosch VIP X1.

A través del puerto Ethernet del servidor web se comunica con la PC mediante *Streaming*, el cual mantiene el flujo de video entre la cámara y la PC en todo momento.

Para visualizar el video se coloca la dirección IP fija del dispositivo en algún navegador web, ver figura 4.41. En seguida se carga la página web *LIVEPAGE*, embebida en el servidor, en donde se despliega el video y el menú *AJUSTES* permite configurar parámetros del video, de la comunicación y de la posición de la cámara.

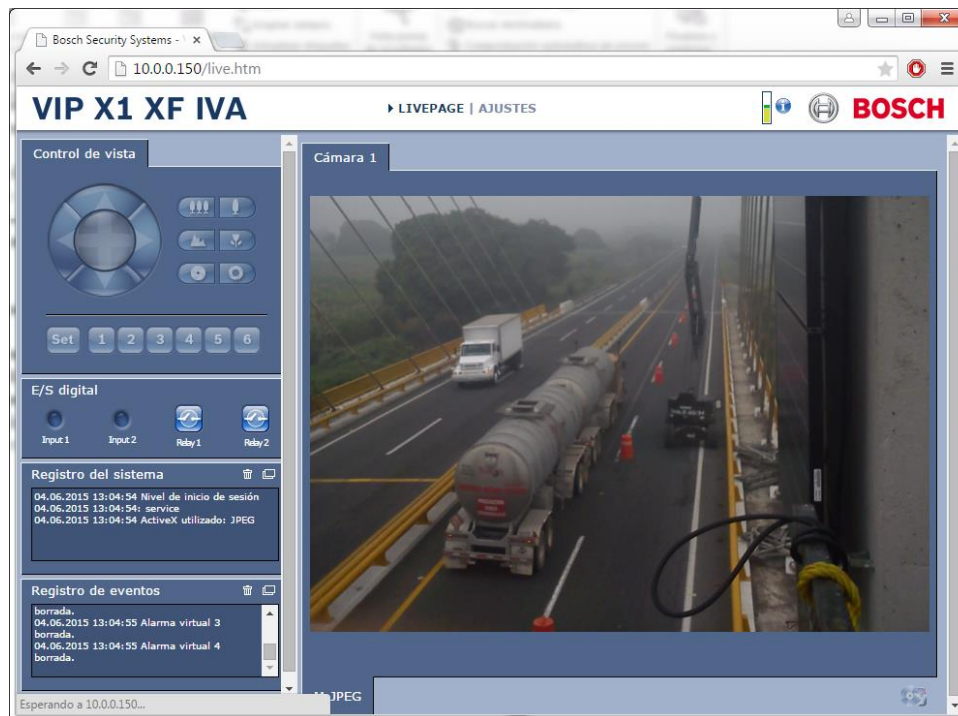


Figura 4.41 Visualizador Web del codificador VIP X1.

Para poder almacenar video desde el Sistema Inteligente de Monitoreo es primordial establecer comunicación entre LabVIEW y el servidor web VIP X1. Por lo cual se revisó en la hoja de datos del dispositivo que protocolos de comunicación son permitidos en el dispositivo. Dentro de los que resaltó RTSP, *Real Time Streaming Protocol* por sus siglas en inglés, el cual permite establecer comunicación mediante *Streaming* entre dos dispositivos con altas tasa de transferencia de datos. *Streaming* hace referencia a descarga continua de datos, en otras palabras, el usuario emplea el archivo de datos continuos en paralelo mientras se descarga. Para establecer la comunicación RTSP entre la cámara marca BOSCH y la PC se utilizó un código de LabVIEW desarrollado por usuarios de estos equipos. El código se adaptó para almacenar bloques de video en tiempo real, para ello se realizaron pruebas con equipos en las instalaciones del IMT y se utilizó el servidor web VIP X1 XF, con características similares a los empleados en el puente Río Papaloapan, este codificador será puesto en servicio en el puente Mezcala, en el estado de Guerrero; además de emplear una Handycam Sony modelo CCD-TRV25 como la entrada de video analógico al servidor web.

En la figura 4.42 se muestra el código adaptado para obtener video mediante comunicación RTSP.

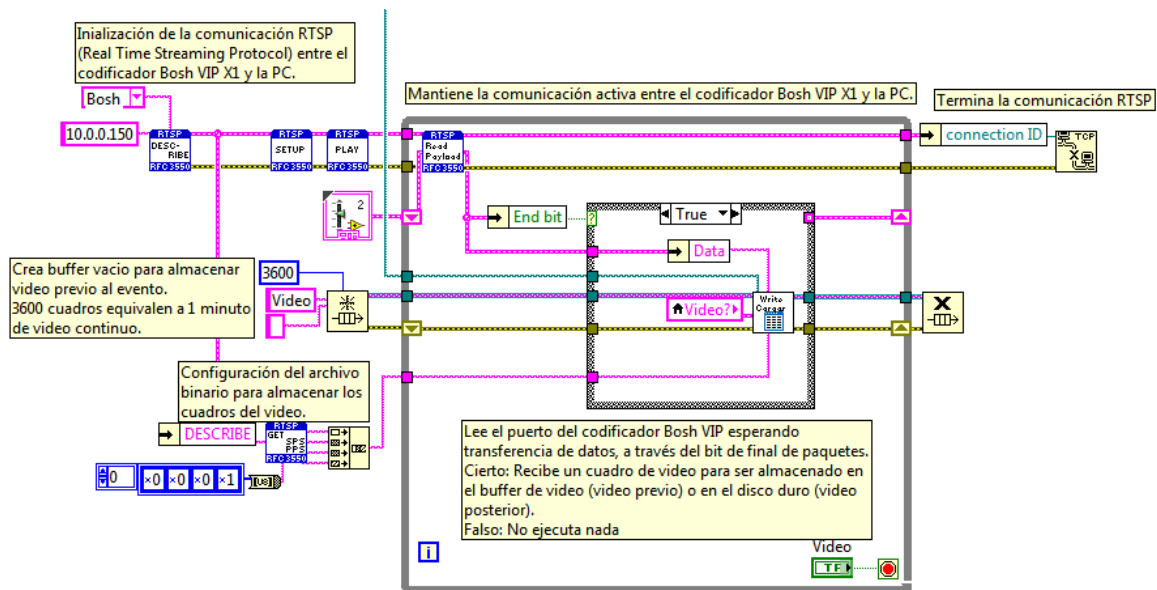


Figura 4.42 Código "Obtener flujo de video por RTSP".

A continuación se describe de manera general el código mostrado. Se establece la comunicación entre el servidor web y la PC, se asigna espacio de memoria RAM para almacenar 3600 cuadros, equivalentes a 1 minuto de video previo y se crea el encabezado del archivo de video para ser almacenado en formato binario. Mientras se reciban paquetes de video en la PC se mantiene la comunicación activa y cuando ocurra un evento extraordinario se almacena el bloque de video previo junto con los cuadros de video después del evento.

Por último, al presentarse un error de comunicación se cierra la comunicación RTSP y se elimina el espacio de memoria asignada para almacenar el video previo.

A continuación se menciona con más detalle el código para almacenar el video previo así como el módulo implementado para almacenar el video posterior al evento.

4.6.7.2 Almacenamiento de video previo a la alarma.

La lógica del código es similar a la empleada para almacenar datos con la información de los sensores. En la figura 4.43 se muestra la sección bajo la condición falsa para el código del módulo nombrado “Almacenar video del evento”. En este caso, cada que se recibe un cuadro de video se comienza a llenar el buffer móvil de video temporal. Como ya se ha mencionado el espacio asignado es de 3600 cuadros.

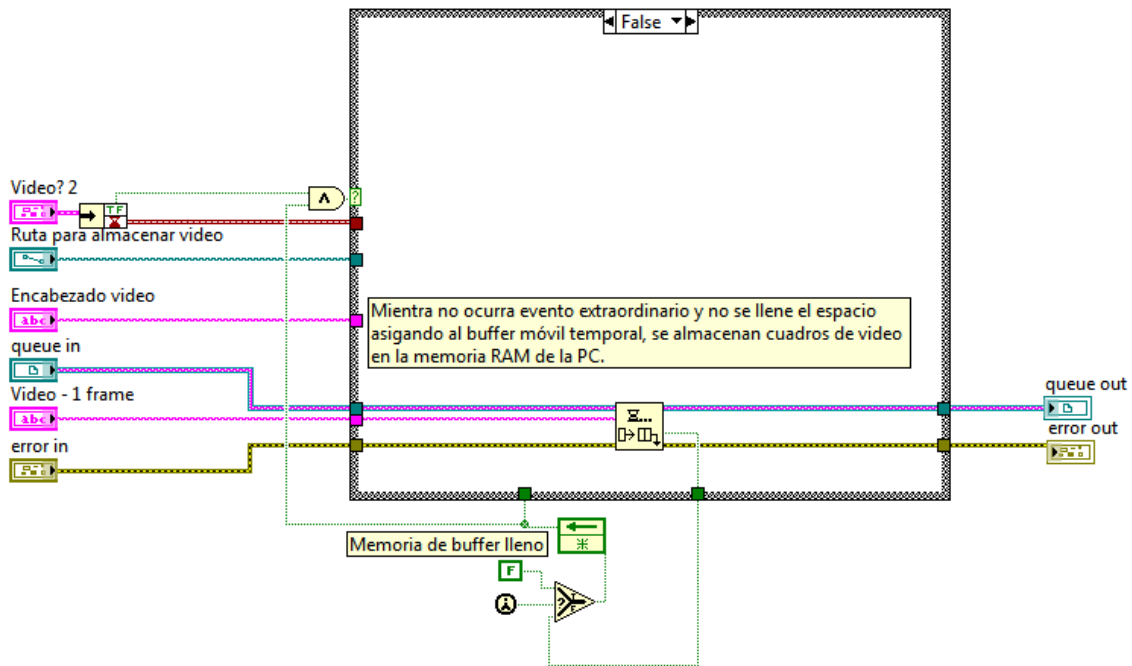


Figura 4.43 Módulo “Almacenar video del evento”: sección crea buffer de video.

La siguiente sección del código comprende cuando se ha detectado un evento extraordinario, cuando esto ocurre el sub-módulo “Ruta para almacenar de video del evento” crea la ruta en donde se almacenará el video, debido a que es la primera vez que se comienza a almacenar el video, se crea el archivo de video comenzando con el encabezado en formato binario. Al mismo tiempo se vacía el buffer de video temporal de la memoria RAM hacia el disco duro de la PC. En otras palabras, se almacena en formato binario el bloque de video previo a la

alarma. En la figura 4.44 se muestra el código de la sección bajo la condición verdadera del módulo “Almacenar video del evento”.

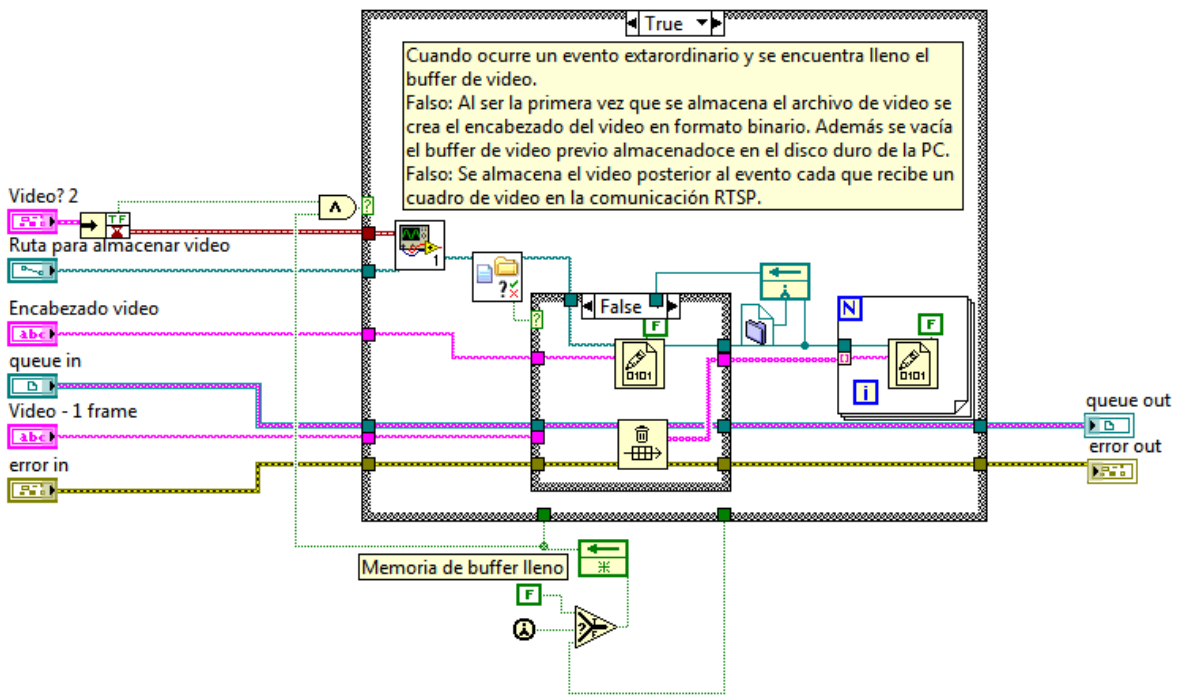


Figura 4.44. Módulo “Almacenar video del evento”: sección descarga buffer de video.

Debido a que el nombre del archivo de video depende del tiempo en que se registró el evento, se adapta el código desarrollado para nombrar los archivos de datos, pero en esta ocasión al archivo de video, ver figura 4.45.

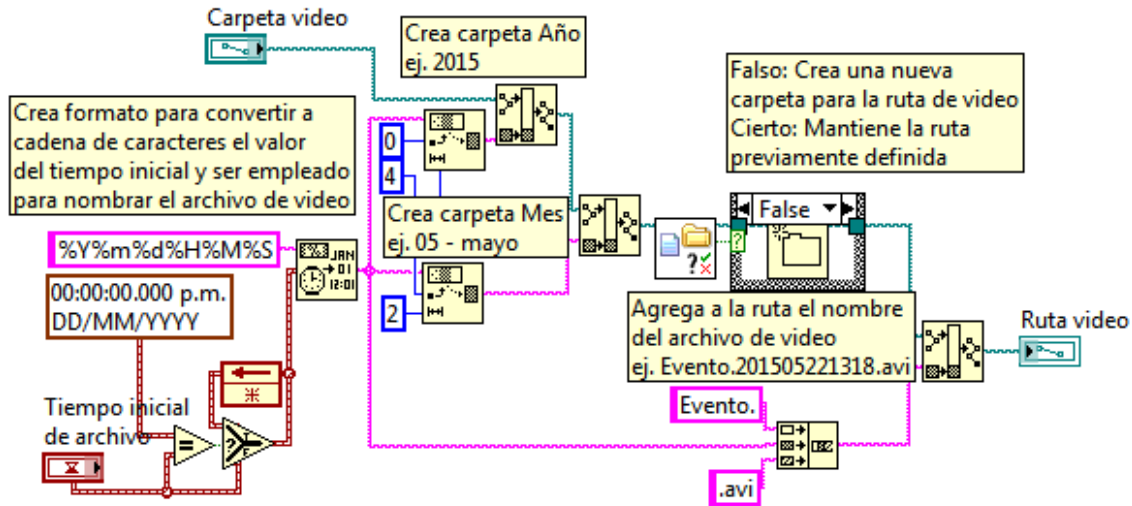


Figura 4.45. Sub-módulo “Ruta para almacenar video del evento”.

4.6.7.3 Almacenamiento de video posterior a la alarma

Por último, para continuar almacenando los cuadros de video al archivo, después de ocurrir el evento se implementó una parte de código que se muestra en la figura 4.46. El código consiste en agregar un cuadro mientras se encuentra activa la señal booleana *almacenar evento*. Dicha señal se desactiva cuando el contador de datos posteriores (CDP), del sub-módulo “Almacenar datos posteriores” sea igual a 7500 datos, equivalentes a 1 minuto posterior de información de los sensores y a su vez de video del evento. En otras palabras, al comenzar a almacenar de manera simultánea los datos de los sensores y el video, cuando deja de grabar los datos de los sensores también deja de almacenar video.

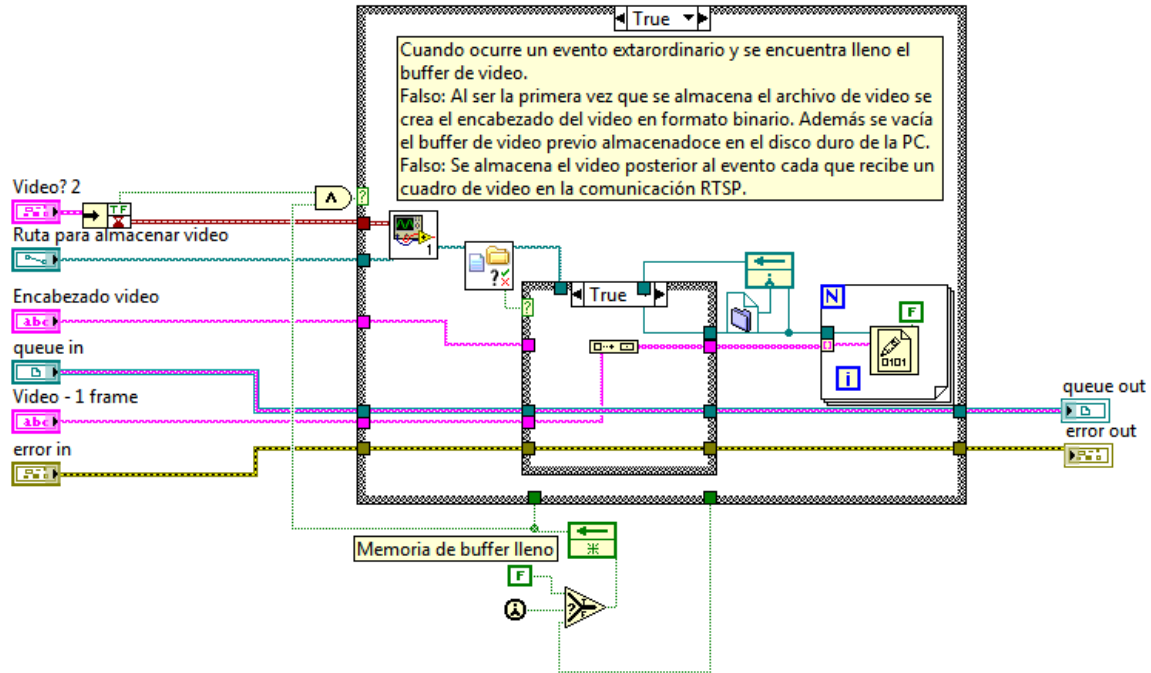


Figura 4.46 Módulo “Almacenar video del evento”: sección video posterior.

En las pruebas realizadas en las instalaciones del IMT se lograron almacenar bloques de video de un minuto previo y uno posterior al evento. Los archivos de video que se guardaron requieren de un espacio de 15 MB. Con una resolución de video de 640 x 480 pixeles a 30 cuadros por segundo.

Con este proceso se terminan las actividades realizadas de manera automática por el SIM. Las actividades restantes se ejecutarán en las instalaciones del IMT, en específico en el Centro de Monitoreo de Puentes y Estructuras Inteligentes. Con lo cual, un ingeniero determinará la causa de la alarma con la ayuda de los datos y video registrado, así como estructurará la alarma en un formato electrónico para posteriormente ser enviada a las respectivas autoridades.

4.7 Pruebas piloto y validación del sim en el puente Río Papaloapan

Al finalizar el proceso de programación y haber ejecutado algunas de las rutinas con datos previos de monitoreo, es importante verificar que las secuencias programadas se realicen tal y como se concibieron. Las pruebas piloto permiten observar el comportamiento del Sistema Inteligente de Monitoreo y determinar si es necesario realizar alguna modificación incluirla antes de dejar funcionando el sistema en el puente. Mientras que el proceso de validación permitirá analizar cada uno de los niveles de alarma.

Debido a que antes de realizar las actividades correspondientes a las pruebas piloto en el puente se presentó una falla en el tirante 1 de la semi-arpa 5, el día 10

de junio de 2015, como consecuencia no se realizaron las pruebas piloto en el puente, ya que se dio prioridad a las actividades de mantenimiento correspondiente a la falla suscitada. Por tal motivo, se realizaron las pruebas piloto en el laboratorio de la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural con los datos recogidos de dos eventos importantes ocurridos en el puente Río Papaloapan. En la tabla 4.24 se muestra los eventos elegidos para realizar las pruebas piloto, así como la fecha y hora en que ocurrieron.

Tabla 4.24 Eventos seleccionados para realizar pruebas piloto.

Evento	Fecha	Hora
Re-encarpetado asfáltico	29/Julio/2014	11:28 a.m.
Falla en tirante 1 semi-arpa 5	10/Junio/2015	7:35 a.m.

Para cada uno de los eventos se emuló el monitoreo continuo mediante los datos almacenados en su momento. El proceso comienza abriendo la plataforma del Sistema Inteligente de Monitoreo, en seguida en el ícono “carpetas” del panel frontal se elige la ruta en donde se encuentran los archivos de interés. Por último, se ejecuta el SIM en el ícono con forma de flecha ubicado en el panel frontal, automáticamente comenzará a desplegar en la gráfica los valores de las deformaciones por carga viva. Al ser superado los límites de operación normal de deformaciones por carga viva, tanto a tensión como a compresión, se crea el archivo de datos y video previo al evento, instantes después se crea el archivo de datos y video posterior al evento, se junta ambos bloques de información para crear uno de datos y otro de video. En seguida, se crea la alarma en un archivo de Excel con la información del evento extraordinario. Finalmente, se envían por correo electrónico tanto los bloques de datos del evento como la alarma prellenada. En las instalaciones del IMT se recibe la alarma junto con los bloques de información para posteriormente encontrar la causa de activación de la alarma y así decidir informar a las autoridades respecto a la alarma detectada.

Mientras se ejecuta el SIM se puede visualizar de manera independiente cada uno de los extensómetros cambiando el valor del control numérico etiquetado como “Sensor”, a un lado se encuentra un indicador etiquetado como “Nombre de sensor” en donde se visualiza el nombre del extensómetro graficado en ese momento. La gráfica presenta una ventana de visualización de los últimos 16 segundos de monitoreo.

La figura 4.47 presenta el panel frontal del Sistema Inteligente de Monitoreo segundos después de presentarse la falla en el tirante 1 de la semi-arpa 5, los datos graficados en color azul representan al extensómetro R1, mientras que en color rojo se muestran los valores del sensor que superaron los límites de operación normal.

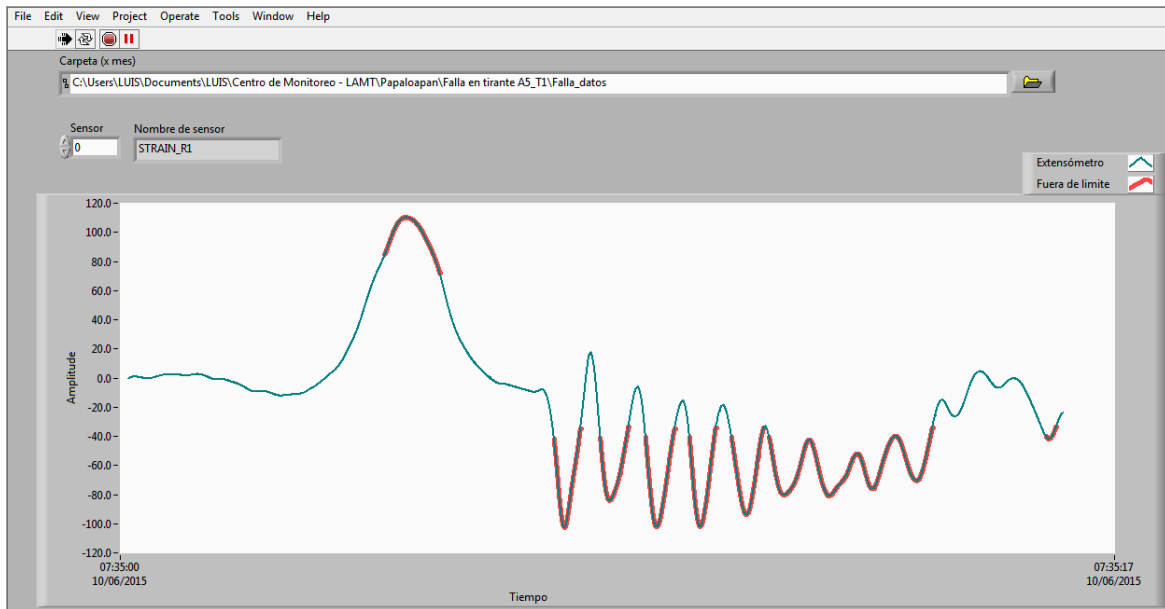


Figura 4.47 Panel frontal del SIM durante la falla del tirante 1 de la semi-arpa 5.

5 Análisis de Resultados

5.1 Re-encarpetado asfáltico

Al ejecutar el Sistema Inteligente de Monitoreo empleando los datos registrados por el monitoreo continuo el día 29 de julio de 2014, se detectó un evento extraordinario a las 11:28:44 a.m. en el sensor de deformación R4 ubicado aguas arriba. Al transitar un vehículo se detectó un pico de deformación de amplitud de $-35 \mu\epsilon$, superando el límite inferior para cargas vivas a compresión, definido en $-26.22 \mu\epsilon$, ambos valores respecto a la referencia de $-29.26 \mu\epsilon$. Automáticamente el SIM creó las carpetas Datos, Eventos extraordinarios, 2014, 07, 29 cada nueva carpeta dentro de la anterior, generando la ruta C:\Documentos\SIM\Datos\Eventos extraordinarios\2014\07\29 en donde se almacenaron los archivos de los eventos extraordinarios que se suscitaron ese día.

En este caso, el primer archivo en crearse fue ALARMAS.20140729.txt en donde se almacenó la información relevante de los sensores que superaron alguno de los límites de deformación por carga viva. El siguiente archivo fue 20140729112743.Evento.txt, correspondiente a un minuto previo al evento extraordinario, los datos de los 62 sensores de fibra óptica fueron almacenados a una frecuencia de adquisición de 125 Hz, debido a la cantidad de información el tamaño del archivo fue de 3.15 MB. Después de haber transcurrido un minuto posterior al acontecimiento, se sobrescribieron en el archivo 20140729112743.Evento.txt el segundo bloque de información correspondiente al minuto posterior al evento, el archivo completo ocupó un tamaño de 6.29 MB. De forma simultánea al archivo de datos, se creó en el fichero 20140729112743.Video.avi que contiene el video un minuto antes y un minuto después del evento. De las pruebas de video con el codificador BOSCH VIP X1 XF el tamaño del archivo fue de 15 MB. El último archivo en generarse es 20140729112743.Alarma.xlsx, el cual es una hoja de cálculo de Microsoft Excel que presenta el formato para el informe de la alarma registrada, el tamaño del archivo es 600 KB. Este archivo se pre-carga de manera automática con información tanto del puente monitoreado como de datos relevantes de la alarma. Los campos del reporte de alarma pendientes por llenar son:

- Causa de la alarma.
- Consecuencia.
- Planes de acción.

- Nombre de quien reporta.

Por último, se enviaron por correo electrónico los archivos para finalizar el llenado del formato de alarma a través del análisis de la información por un ingeniero a cargo en el CMPEI.

En la figura 5.1 se visualiza el formato de alarma “20140729112743.Alarma.xlsx” ocurrida en el puente Río Papaloapan, se observa que el campo nombre del archivo hace referencia al archivo en donde se almacenan los datos de los 62 sensores del minuto previo y minuto posterior al evento. Además de incluir la fecha y hora en que se detectó la alarma, también se muestra el tipo de sensor que la detectó, así como el nombre y la amplitud máxima que registró. Junto a los datos, se grafica en color azul el sensor R4 un minuto previo y posterior a la alarma, mediante una línea segmentada en color amarillo se indica el valor de referencia, deformación causada por carga estática y cambio térmico, con sus respectivos límites inferior y superior de operación normal, los cuales son identificados con líneas continuas en color amarillo. En la última parte del formato de alarma se indica la causa de la alarma, la consecuencia, los planes de acción y el nombre de quien realizó el análisis de la información complementaria del formato.

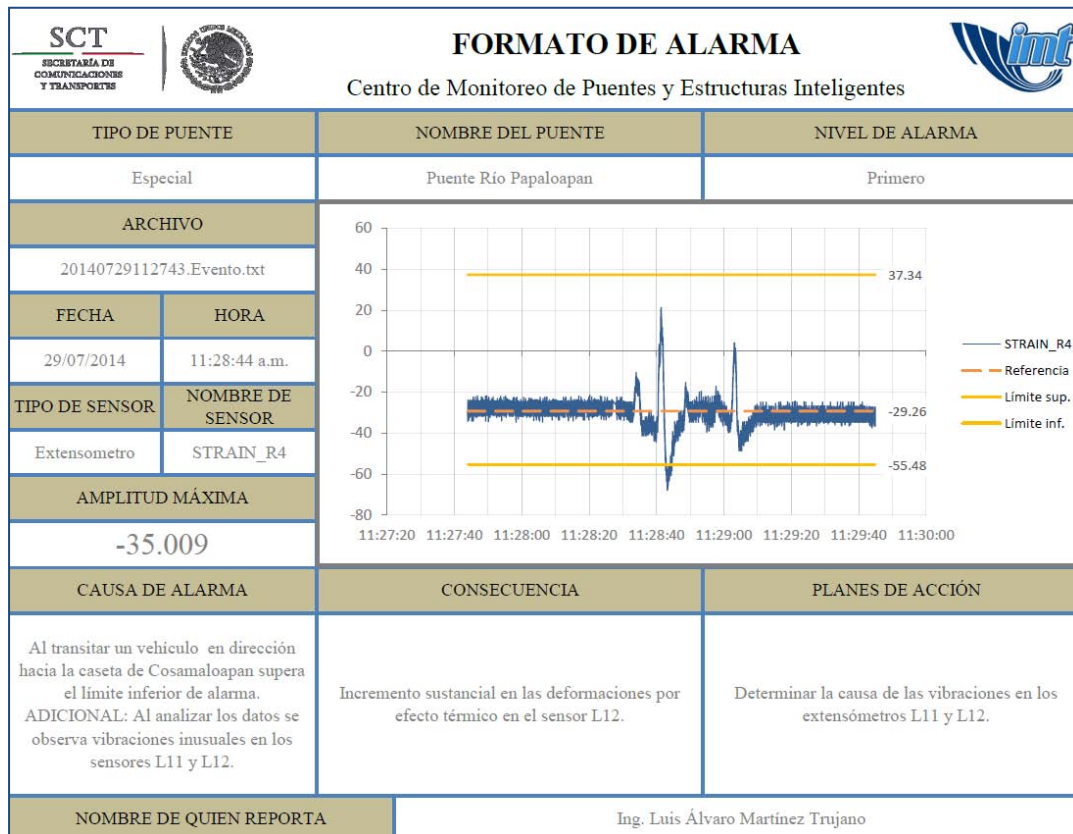


Figura 5.1. Formato de alarma 20140729112743.Alarma.xlsx.

Al analizar los datos se observan vibraciones inusuales en los sensores de deformación L11 y L12. Estos cambios en la frecuencia natural de la viga principal ubicada aguas abajo en el puente, se asocian a la maquinaria empleada para remover la carpeta asfáltica.

En la figura 5.2 se muestra la gráfica del sensor de deformación L12, en él se observan vibraciones poco comunes después de las 11:28:36 a.m. provocadas por las actividades relacionadas al re-encarpetado asfáltico sobre el tablero del puente.

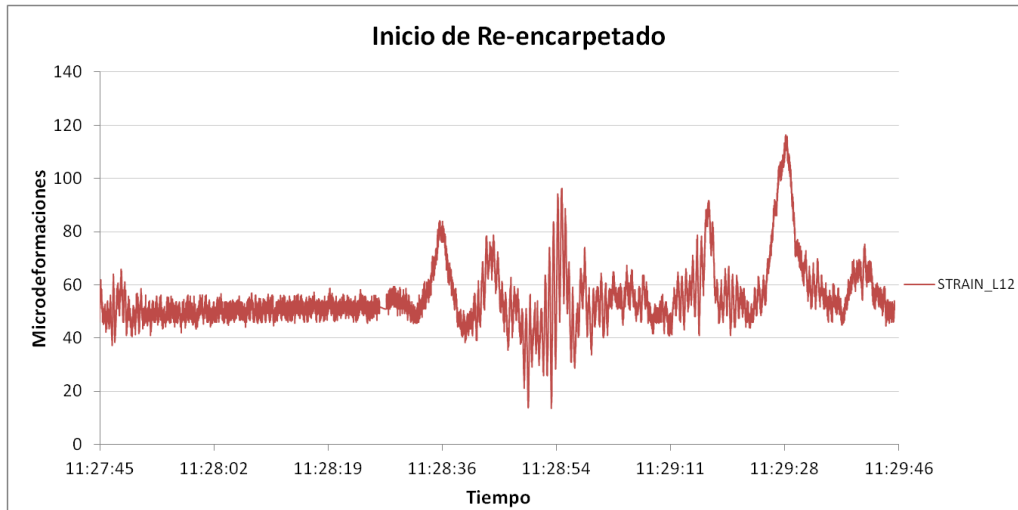


Figura 5.2 Minuto previo y posterior del sensor de deformación L12.

Al graficar la deformación causada por carga estática y efecto térmico del sensor L12, por bloques de 2 minutos durante el periodo de 24 horas, se observa un incremento de $40.95 \mu\epsilon$ a $79.88 \mu\epsilon$ de deformación en la misma hora que comenzaron las actividades de re-encarpetado, ver figura 5.3.

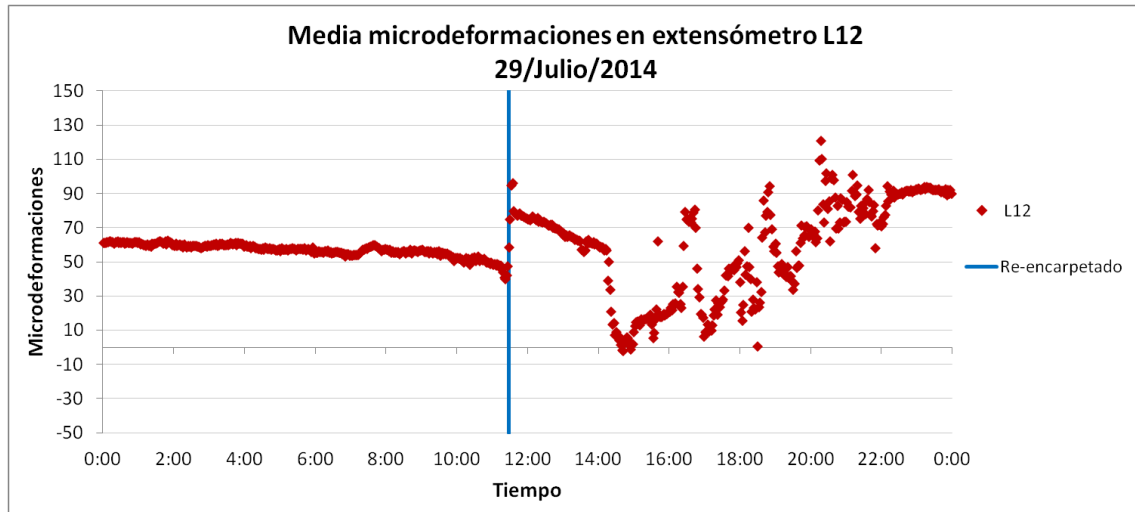


Figura 5.3. Cambio de deformación de carga estática por re-encarpelado en el sensor L12.

El seguimiento a las medias de deformación por bloques de 15 días de información mostró un incremento en las deformaciones a tensión del sensor R4 de $13.94 \mu\epsilon$ a $19.43 \mu\epsilon$, ver figura 5.4. Lo anterior a causa del re-encarpelado, motivo que causó el ajuste de los límites de operación normal.

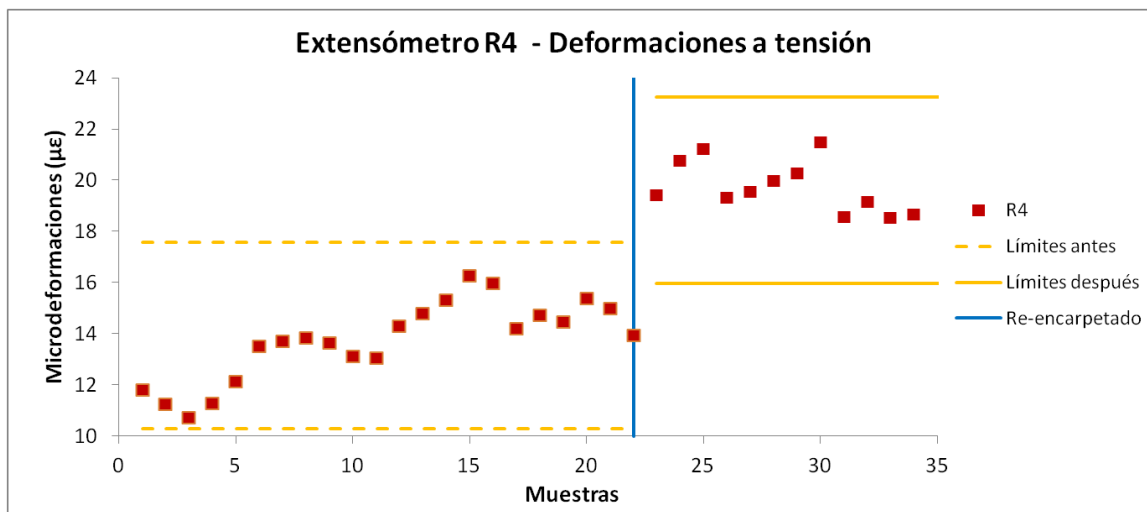


Figura 5.4 Incremento de deformación a tensión en el sensor R4 debido al re-encarpelado.

Los cambios de deformación por las actividades de re-encarpelado para los sensores aguas arriba, se muestran en la tabla 5.1. Las deformaciones antes hacen referencia a la media obtenida del bloque de datos del 16 al 30 de julio de 2014, mientras que las deformaciones después comprenden a la media del periodo 31 de julio al 14 de agosto de 2014.

Tabla 5.1. Cambio de deformación debido al re-encarpetado en los sensores aguas arriba.

Sensor	Distancia (m)	Deformaciones a tensión ($\mu\epsilon$)			Deformaciones a compresión ($\mu\epsilon$)		
		Antes	Después	Cambio	Antes	Después	Cambio
R1	30	34.84	35.27	0.43	-19.46	-19.14	0.32
R2	60	21.00	22.14	1.14	-15.30	-16.24	-0.94
R4	130	13.94	19.43	5.49	-9.50	-13.85	-4.35
R5	160	10.29	10.76	0.47	-9.59	-9.89	-0.30
R6	190	11.00	11.53	0.53	-9.07	-9.29	-0.22
R7	220	65.01	66.22	1.21	-25.22	-27.15	-1.93
R8	250	10.57	10.66	0.09	-9.01	-9.05	-0.04
R9	280	10.16	9.98	-0.18	-9.75	-9.74	0.01
R11	330	7.67	7.57	-0.10	-7.11	-7.01	0.10
R12	360	12.06	12.08	0.02	-8.88	-8.72	0.16

En la figura 5.5 se grafica el cambio de deformación a tensión en color rojo y, a compresión, en color azul para los sensores de deformación instalados debajo de la viga principal aguas arriba por los cambios asociados al re-encarpetado. Los datos pueden ser consultados en la tabla 5.1.

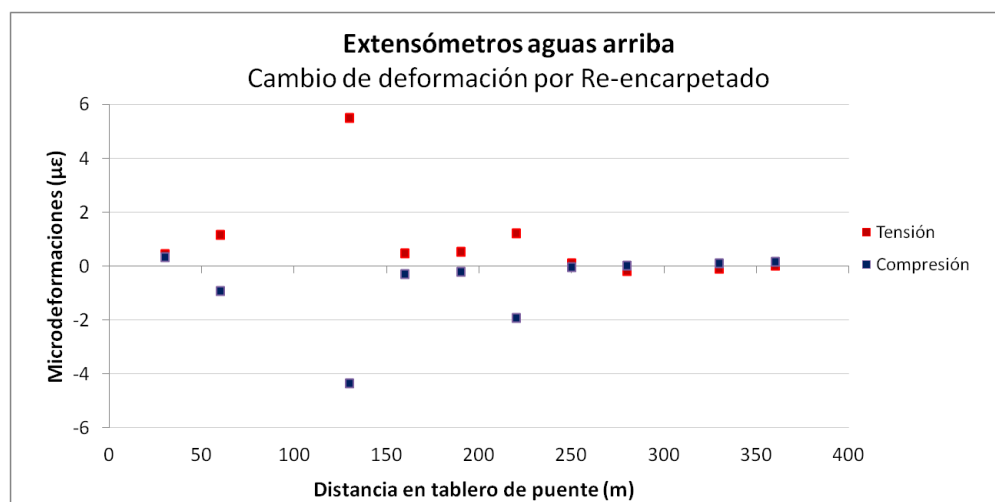


Figura 5.5 Cambio de deformación debido al re-encarpetado en los sensores aguas arriba.

Los cambios de deformación por las actividades de re-encarpetado para los sensores aguas abajo, se muestran en la tabla 5.2. Las deformaciones antes hacen referencia a la media obtenida del bloque de datos del 16 al 30 de julio de 2014, mientras que las deformaciones después comprenden a la media del periodo 31 de julio al 14 de agosto de 2014.

Tabla 5.2. Cambio de deformación debido al re-encarpetado en los sensores aguas abajo.

Sensor	Distancia (m)	Deformaciones a tensión ($\mu\epsilon$)			Deformaciones a compresión ($\mu\epsilon$)		
		Antes	Después	Cambio	Antes	Después	Cambio
L1	30	41.05	40.87	-0.18	-21.68	-21.9	-0.22
L2	60	22.26	22.22	-0.04	-16.34	-16.52	-0.18
L4	130	26.28	27.42	1.14	-19.51	-20.71	-1.20
L5	160	22.01	15.83	-6.18	-14.33	-10.81	3.52
L6	190	39.79	39.15	-0.64	-20.02	-19.91	0.11
L7	220	76.62	76.65	0.03	-34.05	-34.1	-0.05
L8	250	37.55	36.41	-1.14	-25.31	-25.56	-0.25
L9	280	21.73	21.09	-0.64	-18.01	-17.21	0.80
L11	330	36.45	33.57	-2.88	-26.75	-24.32	2.43
L12	360	42.99	41.69	-1.30	-25.45	-24.13	1.32

En la figura 5.6 se grafica el cambio de deformación a tensión, en color rojo, y a compresión, en color azul, para los sensores de deformación instalados debajo de la viga principal aguas abajo, los cambios asociados al re-encarpetado se pueden ver en la tabla 5.2.

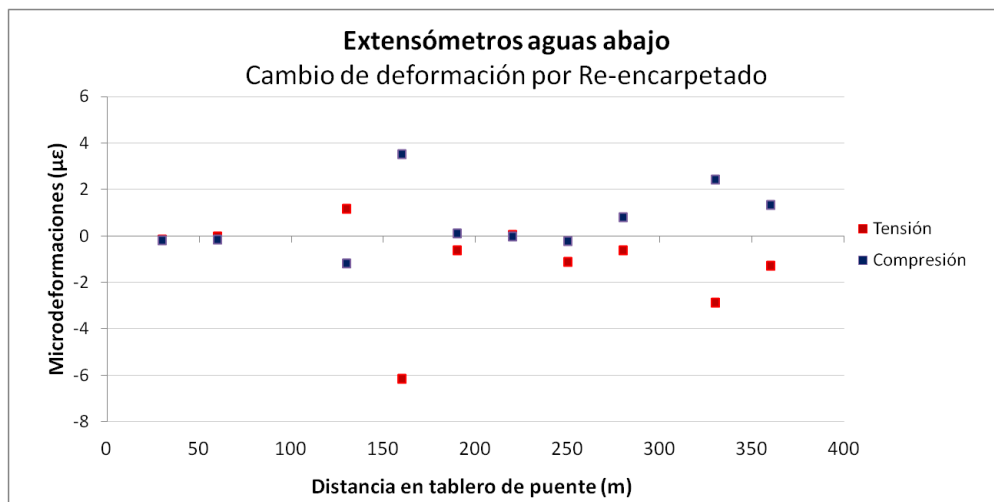


Figura 5.6 Cambio de deformación debido al re-encarpetado en los sensores aguas abajo.

Adicional al incremento de deformaciones por carga estática y efecto térmico, también se observa un incremento en las tensiones de cada uno de los tirantes asociados al incremento de masa por las actividades de re-encarpetamiento. En la figura 5.7 se muestra el incremento en la tensión axial en el tirante 4 de la semi-arpa 1, los datos se grafican por bloques de 2 minutos durante el periodo de 24

horas, se observa un incremento de 155.18 toneladas a 159.78 toneladas al comenzar las actividades de re-encarpetado.

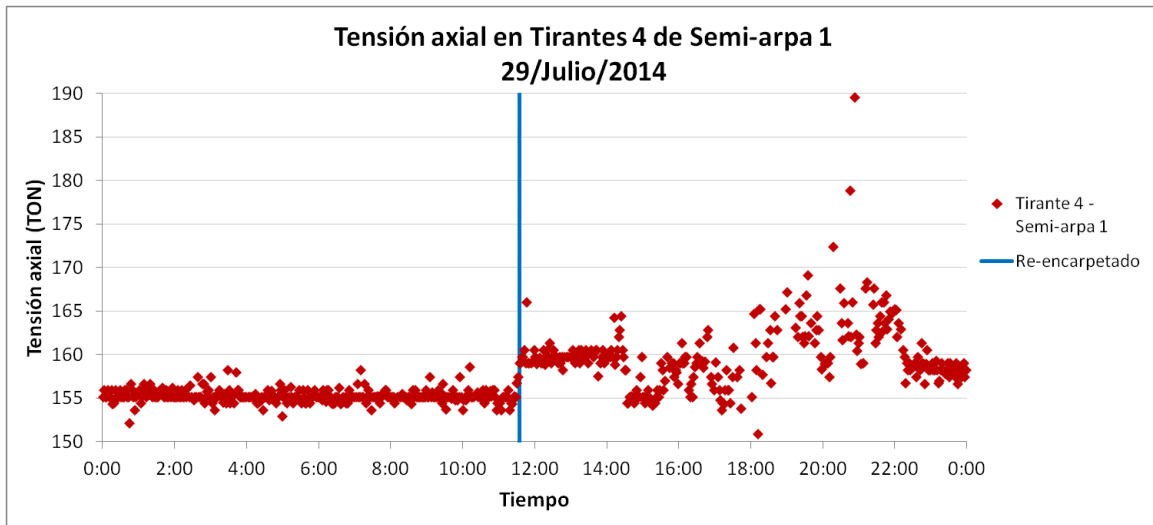


Figura 5.7 Cambio de tensión axial en el tirante 4 de la semi-arpa 1 debido al re-encarpetado.

El seguimiento de la tensión axial por bloques de 15 días de información reveló un incremento de la tensión media del tirante 4 de la semi-arpa 5 de 156.10 toneladas a 157.7 toneladas, ver figura 5.8. Por lo cual se realizó un ajuste de los límites de operación normal.

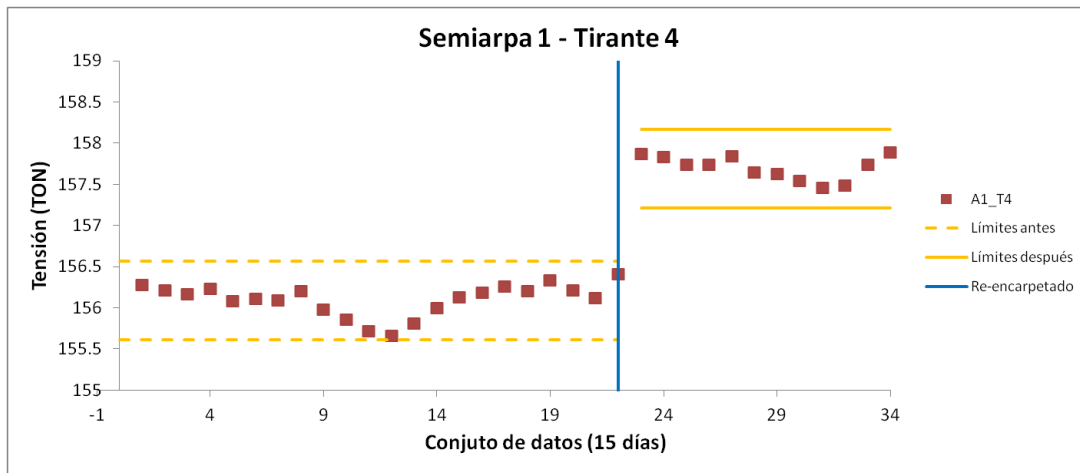


Figura 5.8 Incremento de tensión axial en el tirante 4 semi-arpa 5 debido al re-encarpetado.

Los incrementos de tensión axial en los tirantes instrumentados por las actividades de re-encarpetado se muestran en la tabla 5.3. La tensión antes hace referencia a la media obtenida del bloque de datos del 16 al 30 de julio de 2014, mientras que la tensión después comprende a la media del periodo 31 de julio al 14 de agosto

de 2014. De esta manera los valores mostrados corresponden a la media de tensión para cada ajuste de distribución elegida en cada sensor, los datos se analizaron en bloques de 15 días de información.

Tabla 5.3 Incremento de tensión axial en los tirantes instrumentados debido al re-encarpetado.

Semi- arpa	Tirante 4 (toneladas)			Tirante 11 (toneladas)		
	Tensión antes	Tensión después	Incremento	Tensión antes	Tensión después	Incremento
1	156.10	157.70	1.60	258.34	260.36	2.02
2	195.11	196.94	1.83	268.42	271.07	2.65
3	162.03	163.70	1.67	291.64	294.21	2.57
4	150.80	151.68	0.88	272.46	274.99	2.53
5	157.97	159.80	1.83	246.15	248.45	2.30
6	162.58	164.51	1.93	261.16	263.90	2.74
7	177.31	179.11	1.80	269.32	271.72	2.40
8	162.70	163.61	0.91	247.73	249.75	2.02

En la figura 5.9 se grafica el incremento en las tensiones de los tirantes 4 en color rojo y de los tirantes 11 en color azul para cada una de las semi-arpas instrumentadas, asociadas al re-encarpetado, los datos pueden ser consultados en la tabla 5.3.

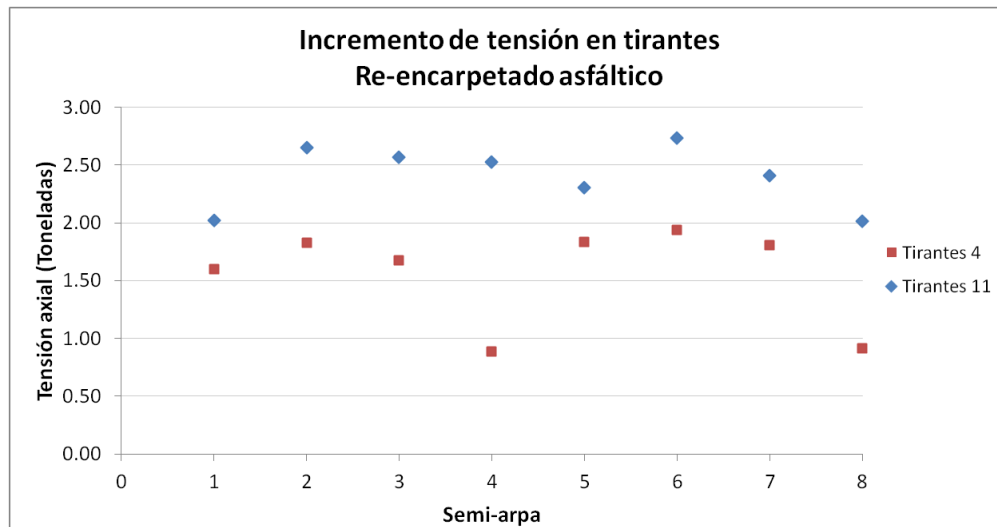


Figura 5.9. Incremento de tensión axial en los tirantes instrumentados por re-encarpetado.

Al comenzar las actividades de re-encarpetado el día 29 de julio de 2014 el máximo incremento en la tensión axial de los tirantes 4 se detectó en la semi-arpa

1 con 4.6 toneladas. Respecto al máximo cambio del valor de la carga estática se registró en el sensor L12, ubicado aguas abajo, con un incremento de 38.93 $\mu\epsilon$.

El seguimiento de las tendencias al comportamiento de los sensores por bloques de 15 días reveló que con respecto a las tensiones en los tirantes número 4 instrumentados de las 8 semi-arpas, el cambio mínimo fue en el tirante 4 de la semi-arpa 4, con un incremento de 0.88 toneladas, mientras que el mayor incremento fue de 1.93 toneladas en la semi-arpa 6. Con relación a los tirantes número 11, el menor incremento se registró en las semi-arpas 1 y 8 con 2.02 toneladas, mientras que el mayor incremento continúa siendo en la semi-arpa 6, con un valor de 2.74 toneladas.

Siguiendo con la tendencia por bloque de 15 día de las cargas vivas en los sensores de deformación, el máximo cambio en los extensómetros aguas arriba se registró en R4 con un incremento tanto a tensión como a compresión con valores de 5.49 $\mu\epsilon$ y -4.35 $\mu\epsilon$, respectivamente. En los sensores aguas abajo el sensor L5 registró los máximos cambios, disminuyendo el valor de la media por cargas tanto a tensión en -6.18 $\mu\epsilon$ como a compresión en 3.52 $\mu\epsilon$.

5.2 Falla en tirante 1 de semi-arpa 5

Al ejecutar el Sistema Inteligente de Monitoreo empleando los datos registrados del monitoreo continuo del día 10 de junio de 2015 se detectó un evento extraordinario a las 7:35:05 a.m. en el sensor de deformación R1, ubicado aguas arriba. Al transitar un vehículo se detectó un pico de deformación de amplitud 110.177 $\mu\epsilon$ superando el límite superior para cargas vivas a tensión, definido en 84.29 $\mu\epsilon$, ambos valores respecto a la referencia de -96.79 $\mu\epsilon$. Automáticamente el SIM generó las carpetas Datos, Eventos extraordinarios, 2015, 06, 10 cada nueva carpeta dentro de la anterior, generando la ruta C:\Documentos\SIM\Datos\Eventos extraordinarios\2015\06\10 en donde se almacenaron los archivos de los eventos extraordinarios que se suscitaron en ese día.

En este caso, el primer archivo creado fue ALARMAS.20150610.txt en donde se almacenó la información relevante de los sensores que superaron alguno de los límites de deformación por carga viva. El siguiente archivo fue 20150610073405.Evento.txt, correspondiente a un minuto previo al evento extraordinario, los datos de los 62 sensores de fibra óptica fueron almacenados a una frecuencia de adquisición de 125 Hz, debido a la cantidad de información el tamaño del archivo fue de 3.16 MB. Después de haber transcurrido un minuto posterior al acontecimiento, se sobrescribieron en el archivo 20150610073405.Evento.txt, el cual corresponde al segundo bloque de información del minuto posterior al evento, el archivo completo ocupa un tamaño de 6.31 MB del disco duro. De forma simultánea al segundo archivo, se creó el fichero 20150610073405.Video.avi que contiene el video un minuto antes y un minuto después del evento. De las pruebas de video con el codificador BOSCH VIP X1 XF el tamaño del archivo fue de 15 MB. El último archivo en generarse fue

20150610073405.Alarma.xlsx, el cual es un fichero en Excel que presenta el formato para el informe de la alarma registrada, el tamaño del archivo es 604 KB. Este archivo se pre-carga de manera automática con información tanto del puente monitoreado como de datos relevantes de la alarma. Los campos del reporte de alarma pendientes por llenar son:

- Causa de la alarma.
- Consecuencia.
- Planes de acción.
- Nombre de quien reporta.

Por último, se enviaron por correo electrónico los archivos para finalizar el llenado del formato de alarma a través del análisis de la información por parte del ingeniero a cargo en el CMPEI.

En la figura 5.10 se visualiza el formato de alarma “20150610073405.Alarma.xlsx” ocurrida en el puente Río Papaloapan, se observa que el campo nombre del archivo hace referencia al archivo en donde se almacenan los datos de los 62 sensores del minuto previo y minuto posterior al evento. Además de incluir la fecha y hora en que se detectó la alarma también se muestra el tipo de sensor que detectó la alarma así como el nombre y la amplitud máxima que registró. Junto a los datos anteriores se grafica en color azul el sensor de deformación R1 un minuto previo y posterior a la alarma, mediante una línea segmentada en color amarillo se indica el valor de referencia, deformación causada por carga estática y cambio térmico, con sus respectivos límites inferior y superior de operación normal, identificadas con líneas continuas en color amarillo. En la última parte del formato de alarma se indica la causa de la alarma, la consecuencia, los planes de acción y el nombre de quien reportó la información introducida manualmente.

SCT SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES				
FORMATO DE ALARMA				
Centro de Monitoreo de Puentes y Estructuras Inteligentes				
TIPO DE PUENTE	NOMBRE DEL PUENTE	NIVEL DE ALARMA		
Especial	Puente Río Papaloapan	Primero		
ARCHIVO				
20150610073405.Evento.txt				
FECHA				HORA
10/06/2015				07:35:05 a.m.
TIPO DE SENSOR				NOMBRE DE SENSOR
Extensometro				STRAIN_R1
AMPLITUD MÁXIMA	110.177			
CAUSA DE ALARMA	CONSECUENCIA	PLANES DE ACCIÓN		
Vehículo al transitar en dirección hacia la Tinaja supera el límite superior del sensor de deformación R1, al transitar sobre R2 causa FALLA SÚBITA en el tirante 1 de la semi-arpa 5.	Al analizar los datos de deformación se observan cambios permanente en los extensómetros aguas arriba R1, R2, R4 así como en los L1, L2 y L4 ubicados aguas abajo. También en se incrementó en 16 toneladas la tensión axial del tirante 4 de la semi-arpa 5.	Determinar la causa de la falla del tirante.		
NOMBRE DE QUIEN REPORTA	Ing. Luis Álvaro Martínez Trujano			

Figura 5.10 Formato de alarma 20150610073405.Alarma.xlsx.

Al analizar los datos se observan vibraciones inusuales segundos después de pasar el vehículo, así como un cambio permanente de deformación por carga estática. Las vibraciones se detectaron en todos los sensores de deformación instalados en el puente, las cuales se asocian a la falla del tirante 1 de la semi-arpa 5. En la tabla 5.4 se muestra información relevante del paso del vehículo que provocó la falla del tirante al transitar sobre el puente.

Tabla 5.4. Datos del vehículo que provocó la falla del tirante en los sensores aguas arriba.

Aguas Arriba	Distancia (m)	Hora	Deformación máxima a tensión ($\mu\epsilon$)
R1	30	07:35:04.6 a.m.	113.67
R2	60	07:35:06.4 a.m.	71.58
R4	130	07:35:08.8 a.m.	19.24
R5	160	07:35:10.8 a.m.	25.62
R6	190	07:35:12.6 a.m.	25.22
R7	220	07:35:15.2 a.m.	325.22
R8	250	07:35:17.3 a.m.	28.02
R9	280	07:35:19.3 a.m.	38.89
R11	330	07:35:21.3 a.m.	18.34
R12	360	07:35:23.6 a.m.	24.29

En la figura 5.11 se visualizan los sensores de deformación aguas arriba un minuto antes y un minuto después del evento registrado asociado a la falla del tirante. Las flechas ascendentes en color negro indican el vehículo en cada sensor de deformación mientras que la línea vertical en color gris el momento en que ocurrió la falla.

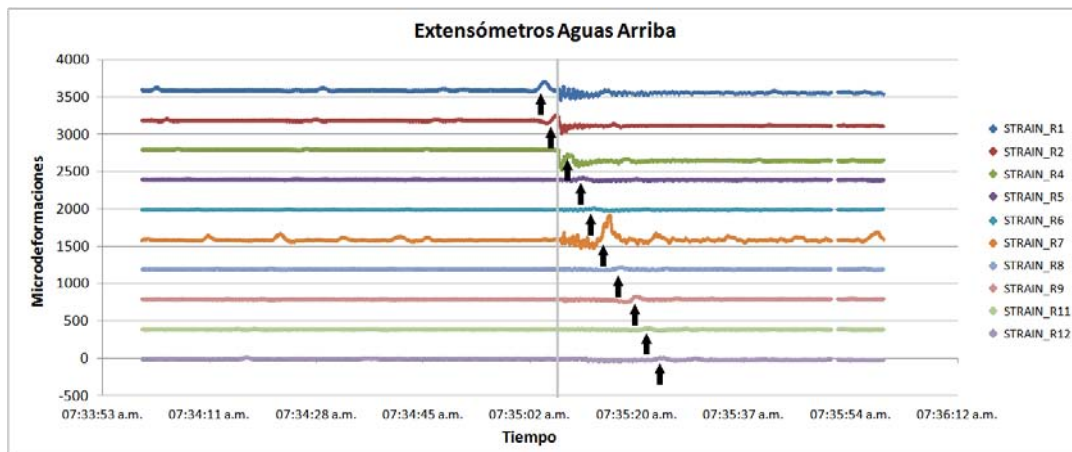


Figura 5.11. Transito del vehículo que provoco la falla en el tirante 1 de la semi-arpa 5.

En la tabla 5.5 se recopila la información del cambio permanente de deformación por carga estática que sufrió cada uno de los sensores de deformación instalados debajo de las vigas principales del puente.

Tabla 5.5. Deformación permanente en los extensómetros provocada por la falla del tirante.

Aguas Arriba	Deformación permanente ($\mu\epsilon$)	Aguas Abajo	Deformación permanente ($\mu\epsilon$)
R1	-37.8	L1	-14.9
R2	-70.8	L2	53.0
R4	-145.4	L4	-26.6
R5	-3.5	L5	-2.8
R6	-1.6	L6	2.5
R7	-2.3	L7	4.8
R8	-0.6	L8	-1.1
R9	2.0	L9	-3.2
R11	-0.4	L11	-4.2
R12	-10.0	L12	2.9

De la tabla anterior se observa que los mayores cambios de deformaciones, a causa de la falla en el tirante, se encuentran en el conjunto de sensores R1, R2 y R4 para los extensómetros aguas arriba, mientras que para los sensores instalados aguas abajo está en L1, L2 y L4.

En la figura 5.12 se muestra la deformación permanente para el conjunto de sensores de deformación ubicados aguas arriba.

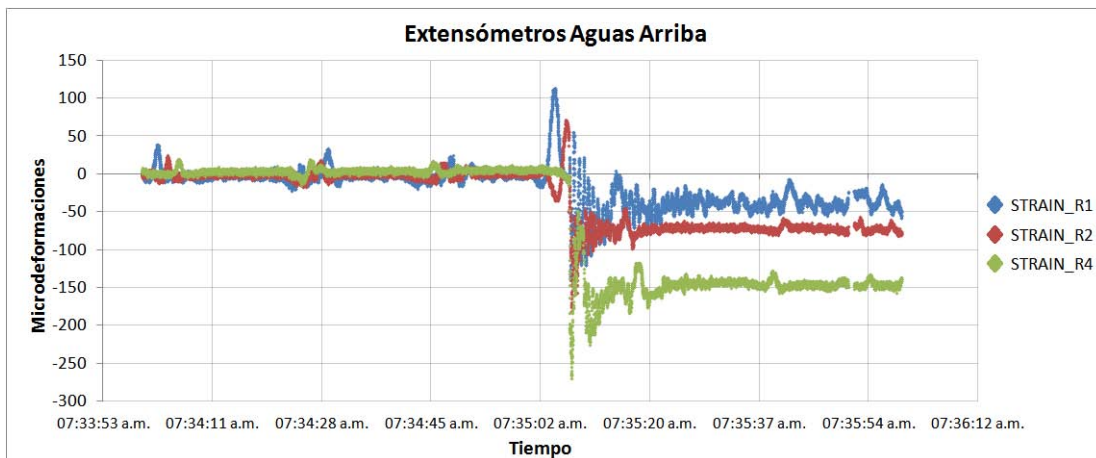


Figura 5.12. Deformación permanente en los sensores R1, R2 y R4 por falla del tirante.

En la figura 5.13 se muestra la deformación permanente para el conjunto de sensores de deformación instalados aguas abajo provocado por la falla en el tirante.

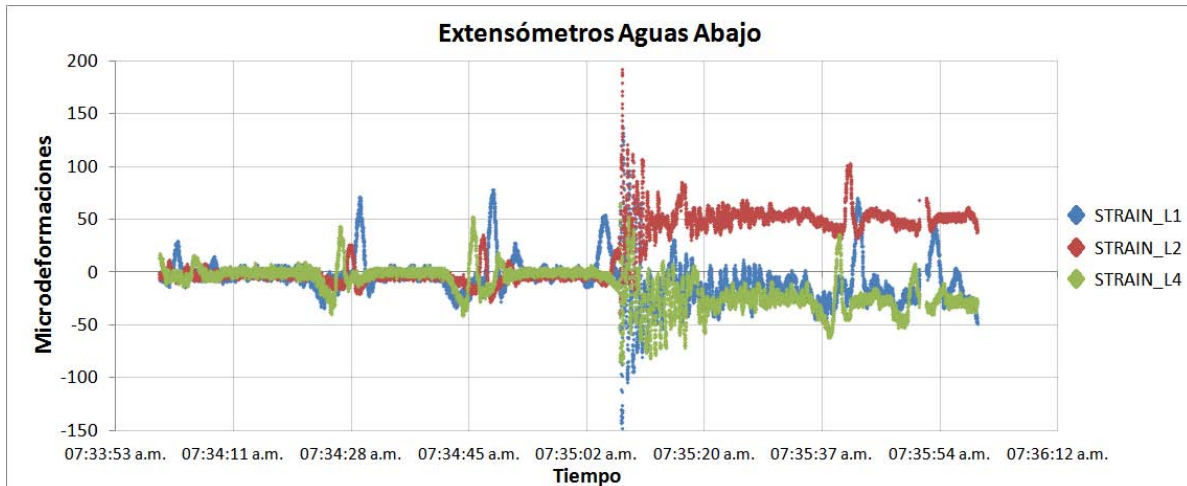


Figura 5.13. Asentamiento en los sensores de deformación L1, L2 y L4.

Adicional al cambio permanente de deformaciones por carga estática, también se observó un cambio en las tensiones de cada uno de los tirantes instrumentados de la pila 2 al redistribuirse las cargas del tablero del puente en el resto de tirantes próximos a la zona de falla.

En la figura 5.14 se muestra la redistribución de tensiones en los tirantes 4 de la pila 2, los datos se grafican por bloques de 2 minutos durante el periodo de las 6 a.m. a las 8:24 a.m., se observa en el tirante 4 de la semi-arpa 5 un incremento de 160 toneladas a 177 toneladas a causa de la falla del tirante 1 de esa semi-arpa.

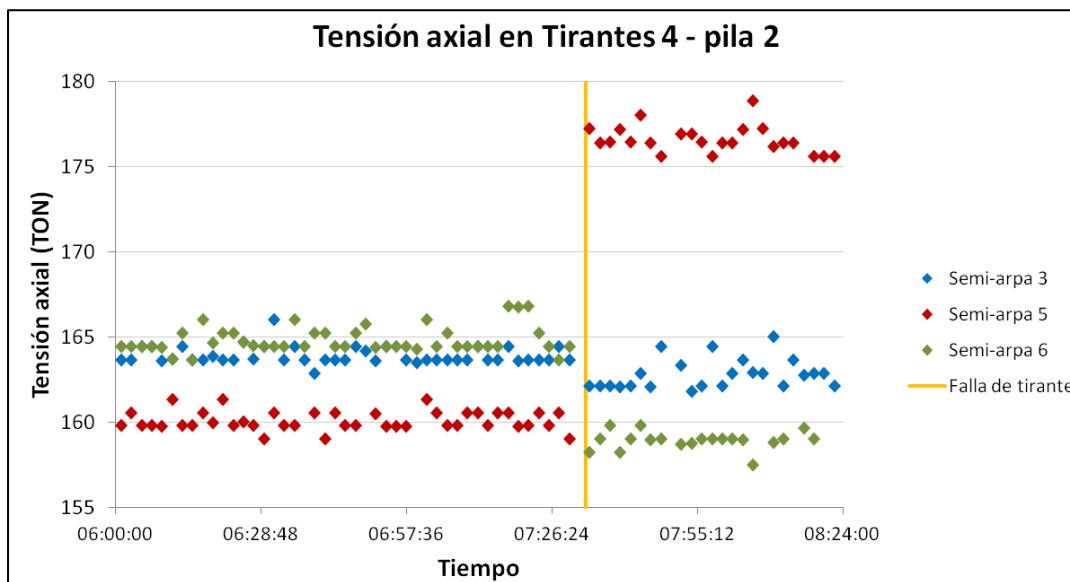


Figura 5.14. Redistribución de las tensiones en los tirantes 4 de la pila 2.

El seguimiento de la tensión axial por bloques de 15 días de información reveló un incremento de 14.86 toneladas de la tensión media del tirante 4 de la semi-arpa 5,

al pasar de 159.95 a 174.81 toneladas, ver figura 5.15. Por lo que se realizó reajuste en los límites de operación.

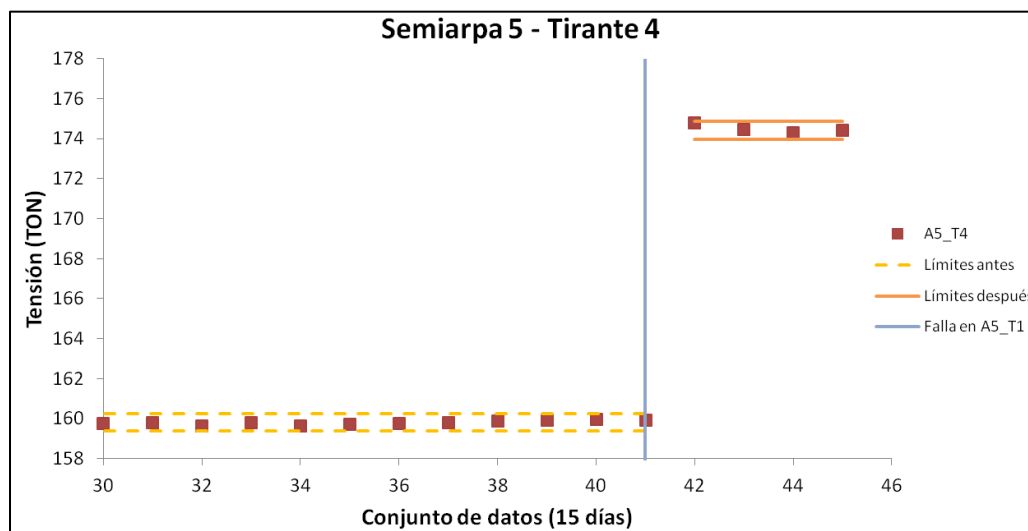


Figura 5.15 Incremento en la tensión del tirante 4 de la semi-arpa 5 por falla en el tirante.

Las redistribuciones de cargas por la falla del tirante 1 de la semi-arpa 5 en los tirantes instrumentados, se muestran en la tabla 5.6. La tensión antes de la falla hace referencia a la media obtenida del bloque de datos del 27 de mayo al 11 de junio de 2015, mientras que la tensión después de la falla comprende a la media del periodo del 1° al 16 de julio de 2015. De esta manera los valores corresponden a la media de tensión por cada función de distribución elegida en cada tirante, los datos se analizaron en bloques de 15 días de información.

Tabla 5.6 Redistribución de tensión en los tirantes instrumentados por falla en el tirante.

Semi-arpa	TIRANTES 4 (toneladas)			TIRANTES 11 (toneladas)		
	Tensión antes	Tensión después	Cambio	Tensión antes	Tensión después	Cambio
1	157.97	158.17	0.20	260.84	260.97	0.13
2	197.08	197.31	0.23	270.98	271.44	0.46
3	163.86	162.86	-1.00	293.74	294.33	0.59
4	151.43	153.20	1.77	274.79	274.63	-0.16
5	159.95	174.81	14.86	247.86	247.39	-0.47
6	164.73	158.35	-6.38	263.65	263.90	0.25
7	179.17	179.38	0.21	271.74	271.77	0.03
8	163.84	163.98	0.14	250.03	250.07	0.04

En la figura 5.16 se muestra la redistribución de las tensiones en los tirantes 4 en color rojo y de los tirantes 11, en color azul, para cada una de las semi-arpas instrumentadas, asociadas a la falla del tirante 1 de la semi-arpa 5, los datos pueden ser consultados en la tabla 5.6.

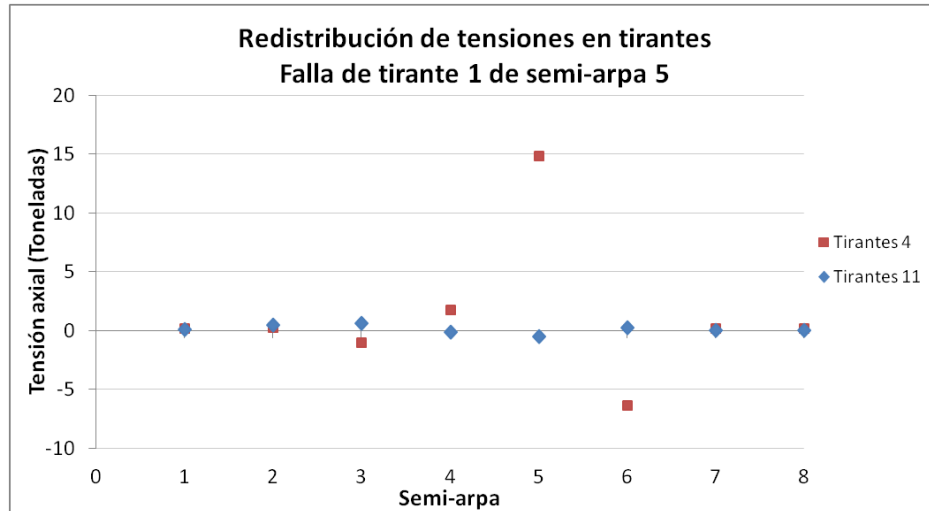


Figura 5.16 Redistribución de las tensiones en los tirantes por falla en T1-A5.

El seguimiento de las medias por carga viva en los sensores de deformación aguas arriba debido a la falla del tirante 1 semi-arpa 5, se indica en la tabla 5.7. Las deformaciones antes de la falla hacen referencia a la media obtenida del bloque de datos del 27 de mayo al 11 de junio de 2015, mientras que las deformaciones después de la falla comprenden a la media del periodo del 1° al 16 de julio de 2015.

Tabla 5.7 Cambio de deformación en los sensores aguas arriba debido a la falla en T1-A5.

Aguas Arriba	Distancia (m)	Deformaciones a tensión ($\mu\epsilon$)			Deformaciones a compresión ($\mu\epsilon$)		
		Antes	Después	Cambio	Antes	Después	Cambio
R1	30	34.79	31.94	-2.88	-19.38	-18.42	0.96
R2	60	22.01	14.59	-7.42	-16.11	-11.99	4.12
R4	130	18.94	18.57	-0.37	-13.89	-14.52	-0.63
R5	160	11.82	11.05	-0.77	-10.64	-10.23	0.41
R6	190	11.56	10.90	-0.66	-9.31	-8.96	0.35
R7	220	71.50	64.40	-7.10	-33.08	-32.05	1.03
R8	250	11.74	10.85	-0.89	-9.68	-9.32	0.36
R9	280	9.98	9.57	-0.41	-9.70	-9.46	0.24
R11	330	8.47	7.86	-0.61	-7.76	-7.39	0.37
R12	360	13.30	12.05	-1.25	-9.37	-8.84	0.53

En la figura 5.17 se grafica el cambio de deformación por carga viva en efectos a tensión, en color rojo, y a compresión, en color azul, para los sensores de deformación instalados debajo de la viga principal aguas arriba, los datos se pueden ver en la tabla 5.7.

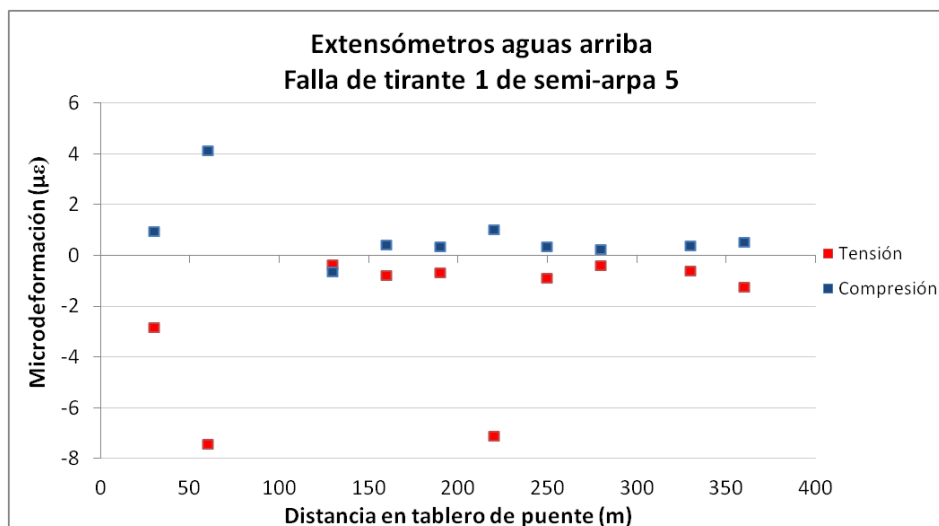


Figura 5.17 Cambio en los valores de la media de deformación en los sensores aguas arriba por la falla del T1-A5.

En la tabla 5.8 se muestran los cambios de deformación por carga viva en los sensores aguas abajo. Las deformaciones antes de la falla hacen referencia a la media obtenida del bloque de datos del 27 de mayo al 11 de junio de 2015, mientras que las deformaciones después de la falla comprenden a la media del periodo del 1° al 16 de julio de 2015.

Tabla 5.8. Cambio de deformación en los sensores aguas abajo debido a la falla en T1-A5.

Aguas Arriba	Distancia (m)	Deformaciones a tensión (µε)			Deformaciones a compresión (µε)		
		Antes	Después	Cambio	Antes	Después	Cambio
L1	30	41.44	44.09	2.65	-22.85	-24.67	-1.82
L2	60	20.14	26.97	6.83	-14.74	-18.28	-3.54
L4	130	27.20	29.39	2.19	-20.70	-22.40	1.70
L5	160	12.79	11.66	-1.13	-9.86	-9.28	0.58
L6	190	39.61	41.49	1.88	-20.61	-21.41	-0.80
L7	220	76.14	81.90	5.76	-34.06	-38.24	-4.18
L8	250	37.16	38.92	1.76	-26.43	-28.42	-1.99
L9	280	20.70	21.65	0.95	-16.80	-17.97	-1.17
L11	330	33.43	36.13	2.70	-24.33	-26.14	-1.81
L12	360	40.58	42.12	1.54	-23.18	-24.80	1.62

En la figura 5.18 se grafica el cambio de deformación por carga viva en efectos a tensión, en color rojo, y a compresión, en color azul, para los sensores de deformación instalados debajo de la viga principal aguas abajo, los datos se pueden consultar en la tabla 5.7.

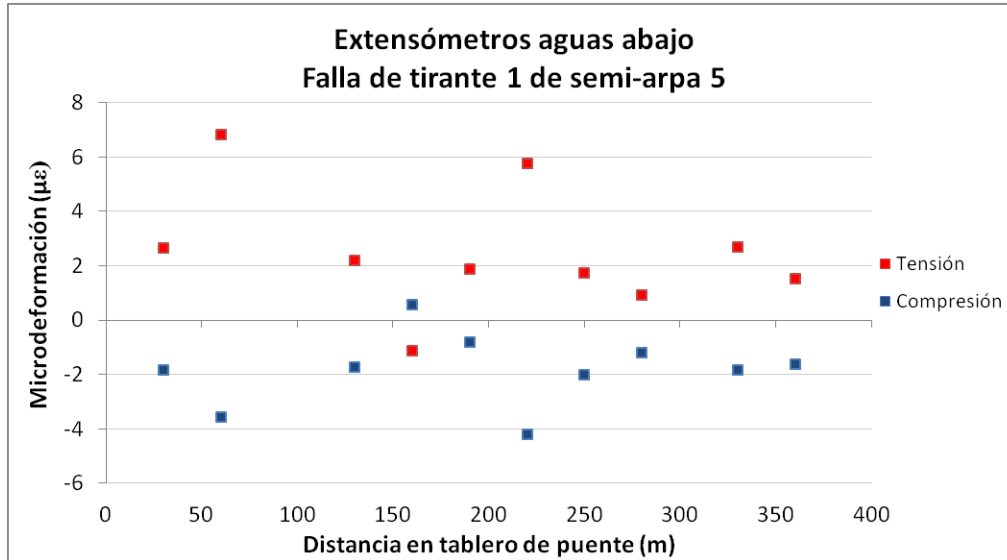


Figura 5.18 Cambio del valor de la media de deformación en sensores aguas abajo por falla la falla del T1-A5.

Inmediatamente después de la falla presentada en el tirante 1 de las semi-arpa 5 el día 10 de junio de 2015, se redistribuyeron las tensiones en los tirantes próximos a la zona de la falla. El máximo cambio se registró en el tirante 4 de la semi-arpa 5 con un incremento de 17 toneladas. Adicional a la redistribución de cargas en los tirantes, se registraron cambios permanentes de deformación en las vigas principales aguas arriba y aguas abajo, registrados por los respectivos conjuntos de sensores de deformación R1, R2 y R4 así como L1, L2 y L4. El máximo cambio detectado en el conjunto de sensores aguas arriba se registró en el sensor R4 con un valor de $-145.4 \mu\epsilon$ seguido del sensor R2 con un valor de deformación $53 \mu\epsilon$. Del seguimiento de las tendencias al comportamiento de los sensores por bloques de 15 días se reveló que, con respecto a las tensiones en los tirantes instrumentados, el máximo cambio se registró en el tirante 4 de las semi-arpa 5 con un valor de 14.86 toneladas. Sobre las cargas vivas en los sensores de deformación, el cambio máximo en los sensores aguas arriba se registró en R2 con un decremento en las cargas vivas a tensión de $-7.42 \mu\epsilon$ y decremento en las cargas vivas a compresión de $4.12 \mu\epsilon$, mientras que en los sensores aguas abajo el sensor L2 registró el cambio máximo, aumentando el valor de la media por cargas tanto a tensión en $6.83 \mu\epsilon$ como a compresión en $-3.54 \mu\epsilon$.

6 Conclusiones

La metodología se desarrolló como estrategia para el monitoreo remoto de puentes del Centro de Monitoreo de Puentes y Estructuras Inteligentes pero el concepto puede ser utilizado en cualquier estructura o elemento mecánico instrumentado y monitoreado.

La metodología propuesta demostró ser capaz de emplearse como una herramienta de desarrollo para generar protocolos de actuación, los cuales se ejecutan de manera inmediata cuando se supera un límite de alarma, a través de estos protocolos se puede dar seguimiento de las tendencias de los parámetros estructurales definidos por las estrategias de monitoreo a mediano y largo plazo.

El éxito de la metodología se basa en tres aspectos. El primero; la caracterización tanto de la estructura como de la aplicación del monitoreo, ya que con base en esos datos se define el tipo de instrumentación a emplear. El segundo; la adecuada definición de las alarmas, debido a que con esta información se generan los protocolos de actuación. El último; las recomendaciones para la programación del Sistema Inteligente de Monitoreo, sólo de esta manera se obtendrá la mínima cantidad de datos que revelen la información crucial de la condición de la estructura o elemento que es monitoreado.

El Sistema Inteligente de Monitoreo fue programado para detectar una alarma de manera automática y almacenar los datos de las respuestas dinámicas de los sensores y el video, tanto antes como después de la alarma, un registro con los datos relevantes de la alarma y un formato de alarma pre-llenado. La información es enviada al Centro de Monitoreo de Puentes y Estructuras inteligentes para su evaluación. Es importante mencionar el tiempo entre la detección de la alarma en el puente y la recepción de la información en el IMT, depende únicamente de la calidad de la señal del sistema de comunicación, ya sea satelital o módem 3G.

La mejor estrategia para la detección inmediata de un evento extraordinario es emplear el límite de operación normal para las deformaciones instantáneas por cargas vivas, ya que la comparación entre el valor de deformación y el límite definido, se realiza de manera continua en todo momento. En cambio, al emplear los límites de operación normal de la tensión en los tirantes, el cambio de tensión instantáneo se detecta en un periodo de tiempo posterior, ya que el valor de la tensión axial en el tirante está en función de la frecuencia que, a su vez, depende del tiempo en ser registrada la respuesta de aceleraciones a procesar.

El filtro pasa banda propuesto para el pre-procesado de los datos en la detección de las deformaciones instantáneas de los sensores de deformación, reveló un excelente desempeño para detectar los picos de deformación a tensión como a

compresión, permitiendo separar los efectos asociados a carga muerta y deriva térmica. Ya que el error relativo porcentual de las amplitudes registradas en deformaciones por cargas vivas es menor al 3 % de la amplitud real registrada.

En el seguimiento a mediano plazo de los parámetros de interés a través de los ajustes de distribución estadística, resulta prioritario generar una base de información del estado actual de las deformaciones por cargas vivas como de las tensiones en los tirantes, mediante el respectivo registro histórico y la correcta elección del tipo de ajuste de distribución estadística, de esta manera los límites operación normal establecidos son confiables.

Al emplear 2 minutos de información en el seguimiento de las tendencias de la media de tensión por bloques de 15 días de información se obtiene una resolución de frecuencia de 0.008333 Hz, el cual representa una resolución de la tensión axial en los tirantes instrumentados entre 0.748 a 0.848 toneladas para los tirantes número 4 y de 2.717 a 2.924 toneladas para los tirantes número 11.

Se observó que el rango de frecuencias de interés para los sensores de deformación, están entre 0.010 Hz y 1.5 Hz, estos valores cubren los cambios por carga viva a tensión y compresión. En el caso de los sensores de aceleración las frecuencias de interés están entre 1.5 Hz y 4 Hz, con este rango es posible localizar la frecuencia natural de oscilación de los tirantes instrumentados, en los casos donde se excita el tercer modo de vibración se requiere de una frecuencia de 12 Hz, por lo que la frecuencia de muestreo de datos deber ser por lo menos de 24 Hz. Es evidente que la frecuencia de adquisición de datos actual en el monitoreo del puente (125 Hz) es 5 veces mayor a la requerida para el análisis de vibraciones en los tirantes y para detectar los picos máximos de deformación por carga viva, los cuales son los fenómenos con mayores efectos dinámicos en el monitoreo del puente Río Papaloapan por lo que podría ser ajustada para generar archivos con menor espacio en el disco duro y facilitar el envío de información en caso de generarse una alarma.

Bibliografía

BERGMEISTER, Konrad. *Monitoring and Safety Evaluation of Existing Concrete Structures*. Final draft. FIB: The International Federation for Structural Concrete, 2003. 304 p. ISBN 978-2-88394-062-8.

De La Fuente, Pablo. *Análisis Dinámico de Estructuras en el Dominio de la Frecuencia*. Tesis de Maestría, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, España., 2011.

Development of a Model Health Monitoring Guide for Major Bridges. AKTAN, Emin. Federal Highway Administration Research and Development. Philadelphia: Drexel Intelligent Infrastructure and Transportation Safety Institute-Drexel University, 2002.

F08b - Guideline for Structural Health Monitoring. RÜCKER, W. SAMCO Final Report. Berlin: Federal Institute of Materials Research and Testing (BAM), 2006.

ISO/DIS 18649:2002 (E). *Mechanical vibration – Evaluation of measurement result from dynamic test and investigation on bridges*. International Organization for Standardization.

MUFTI, Aftab. *Guidelines for Structural Health Monitoring*. Winnipeg: ISIS Canada Corporation, 2001. 127 p. Design Manual No. 2. ISBN 0-9689006-0-7.

Proyecto eBridge: Predicción remota de fallas en puentes. ORTIZ, Giannina. Primera edición. Costa Rica: Tecnológico de Costa Rica, 2012. Investiga.TEC. ISSN 1659-3-383.



Carretera Querétaro-Galindo km 12+000
CP 76700, Sanfandila
Pedro Escobedo, Querétaro, México
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610
Fax +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

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