



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Desarrollo e implementación de un sistema de monitorización estructural en entorno LabView para un modelo reducido de puente para laboratorio

Trabajo realizado por:
Javier Marquínez Olasolo

Dirigido:
David García Sánchez
Javier Torres Ruiz

Titulación:
**Máster Universitario en
Ingeniería de Caminos, Canales y
Puertos**

Santander, julio de 2020

TRABAJO FIN DE MASTER

RESUMEN

La evolución de la tecnología computacional, así como la capacidad de poder elaborar sensores cada vez más pequeños se han unido a la necesidad de vigilar estructuras que se encuentran en un estado de deterioro que puede llegar a ser un peligro físico para las personas y para la red de infraestructuras en la que esté integrada la misma. Por estos motivos la Monitorización Estructural (SHM) se considera una herramienta que debe ser altamente considerada también para futuras implantaciones de estructuras por su ahorro en el coste de mantenimiento y por la mayor capacidad para gestionar las estructuras de forma segura.

El objetivo del conjunto de trabajos planteados por Tecnalía es elaborar un sistema de monitorización estructural (Structure Health Monitoring) que permita obtener los datos de una estructura mediante sensores, enviarlos al dispositivo correspondiente para tratarlos y almacenarlos; y posteriormente dar los avisos pertinentes a los encargados en la gestión de puentes en caso de que ocurra un evento excepcional.

Para este cometido se ha elaborado un programa mediante LabVIEW que permita recoger y analizar estos datos del puente a escala que posee Tecnalía en sus instalaciones y sea capaz de analizar los datos y dar aviso automáticamente cuando detecte valores fuera de rango.

En un futuro se complementará este trabajo con la obtención de imágenes de video para poder observar lo ocurrido en el momento de la alarma, así como para analizar el tráfico existente en la estructura, lo que se conoce como “Weigh in motion”. Este trabajo se enmarca dentro del programa “AULA TECNALIA” mediante el cual se establece una colaboración entre la Escuela y Tecnalía con el objetivo de elaborar varios trabajos fin de máster bajo la tutorización de la empresa. Tecnalía es el primer centro de investigación aplicada y desarrollo tecnológico del estado y posee un importante departamento de investigación en Infraestructuras.

ABSTRACT

The evolution of computer technology, as well as the ability to develop ever smaller sensors, has combined with the need to monitor structures that are in a state of deterioration that can become a physical danger to people and to the infrastructure network in which they are integrated. In view of its usefulness, it should also be highly considered for future implementations of structures because of its savings in maintenance costs and the greater capacity to manage the structures safely.

The aim of the set of works proposed by Tecnalia is to draw up a structural monitoring system (Structure Health Monitoring) that will make it possible to obtain data on a structure by means of sensors, send them to the corresponding device to process and store them; and subsequently give the relevant warnings to those in charge of managing the bridges in the event of an event occurring that goes beyond the established parameters.

The present work is in charge of the first part of the process, the data are obtained from the sensors and later they will be treated and in case an event occurs they will be stored and a warning will be sent so that the data can be analyzed in search of a possible failure in any of the bridge elements.

For this purpose, a programme has been developed using LabVIEW to collect and analyse this data from the bridge to scale that Tecnalia has at its installations and which is capable of analysing the data and automatically warning when it detects values out of range.

In the future, this work will be complemented by obtaining video images to be able to observe what happened at the time of the alarm, as well as to analyse the existing traffic in the structure, which is known as "Weigh in motion".

This work is part of the "AULA TECNALIA" programme through which a collaboration is established between the School and Tecnalia with the aim of drawing up various end-of-master's projects under the tutorship of the company. Tecnalia is the leading centre for applied research and technological development in Spain and has an important research department for infrastructures.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	6
2	ESTADO DEL ARTE	9
2.1	Monitorización de puentes	9
2.2	Antecedentes en la instrumentación de puentes	12
2.2.1	Tipos de monitorización	18
2.3	Monitorización de la Integridad Estructural (SHM).....	22
2.3.1	Objeto de cálculo	22
2.3.2	Etapas en el diagnóstico de la SHM.....	29
2.3.3	Parámetros medidos por los sensores	30
2.3.4	Tecnologías aplicadas en la SHM.....	31
2.4	Software LabVIEW.....	33
2.4.1	Introducción	33
2.4.2	Análisis en línea.....	35
2.4.3	Reducción de la información a analizar.....	36
2.4.4	Categorías de análisis en LabVIEW.....	37
2.4.5	Herramientas de análisis en LabVIEW	37
3	OBJETIVOS.....	38
4	DESARROLLO DEL SISTEMA INTELIGENTE DE MONITORIZACIÓN ...	41
4.1	Caracterización del modelo	41
4.1.1	Descripción del puente.....	41
4.1.2	Material del puente	42
4.1.3	Elementos del puente	43
4.2	Programación del sistema inteligente de monitorización	44
4.2.1	Interpretación del archivo de datos	47
4.2.2	Lectura de datos	48
4.2.3	Pre-procesamiento de los datos: filtrado	50
4.2.4	Comparación de la señal filtrada con los límites de operación	53
4.2.5	Almacenamiento de la información de la alarma	56
4.2.6	Almacenamiento de datos del evento extraordinario	58
4.2.7	Envío de aviso a los responsables vía mail.....	60



5	VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE ALARMA.....	61
6	CONCLUSIONES	70
6.1	Conclusiones sobre el contexto teórico	70
6.2	Conclusiones sobre la adquisición y tratamiento de datos	70
6.3	Futuros trabajos y líneas de investigación.....	71
7	BIBLIOGRAFÍA	72
	ANEJO 1. MODELO DE CÁLCULO	74
	Análisis dimensional	74
	Teoría general del Análisis Dimensional.....	74
	Teorema de Buckingham	75
	Análisis dimensional de modelos.....	76
	Estructuras sometidas a cargas estáticas	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Periodo de oscilación en edificios	6
Figura 2. Ejemplos de sistemas de monitorización(Garita, 2016)	7
Figura 3.Derrumbe del puente Morandi(Génova)	9
Figura 4. Colapso del "Silver Bridge" (Ohio).....	11
Figura 5. Acelerómetros y extensómetros instalados en puente	19
Figura 6. Prueba de carga estática.(Gaute Alonso, 2019)	20
Figura 7. PCD con tablón <i>rilem</i> .(Gaute Alonso, 2019)	21
Figura 8.Proceso de cálculo de un sistema SHM	22
Figura 9. Sensores cableados del puente de laboratorio de Tecnalía.(Merchan et al., 2018).....	25
Figura 10. Ejemplos de visualización LabVIEW.....	34
Figura 11. Panel frontal de la aplicación	34
Figura 12.Diagrama de bloques del programa.....	35
Figura 13. Mejora de prestaciones en función de la elección del momento de la intervención.(Victor Yepes Piqueras, 2018)	38
Figura 14. Diagrama de flujo sistema de monitorización.....	39
Figura 15. Modelización estadística para detección de daños.(Olmo, 2018) ...	40
Figura 16. Imagen puente a escala I.	41
Figura 17. Imagen transversal del puente a escala II.....	42
Figura 18. Detalle de unión articulada con cartela.	42
Figura 19. Detalle de apoyo rígido.....	43
Figura 20. Detalle del apoyo móvil.....	43
Figura 21. Programa completo (parte 1)	45
Figura 22. Programa completo (parte 2)	46
Figura 23. Módulo de borrado de archivos pequeños.	48
Figura 24. Módulo de lectura de archivos.	49
Figura 25. Módulo de extracción de datos.	50
Figura 26.Parámetros de configuración del VI Filter	51

Figura 27. Módulo de arreglo de datos para conversión a señal.....	52
Figura 28. Sub-módulo "Filter"	53
Figura 29. Sub-módulo conversión señal a matriz	53
Figura 30. Submódulo memoria de picos	54
Figura 31. Módulo de comparación y obtención de alerta.....	55
Figura 32. Submódulo de registro de la información de la alarma	57
Figura 33. Módulo de almacenamiento de datos del evento extraordinario	58
Figura 34. Sub-módulo de creación de ruta para datos del evento.	59
Figura 35. Generación de aviso por mail	61
Figura 36. Extensómetros colocados en el puente de laboratorio.....	62
Figura 37. Gráfica de la deformación en los extensómetros	63
Figura 38. Panel de datos de entrada.....	63
Figura 39. Carpeta de datos.	64
Figura 40. Fecha, nombres y datos de los extensómetros.....	65
Figura 41. Extracción de los valores de los extensómetros	65
Figura 42. Señal de los extensómetros antes de filtrar	66
Figura 43. Parámetros de configuración del filtro.....	66
Figura 44. Señal filtrada	67
Figura 45. Matriz de los valores de extensómetros filtrados	67
Figura 46. Aviso de almacenamiento de evento	68
Figura 47. Carpeta de alertas	68
Figura 48. Carpeta de "Eventos Extraordinarios".....	68
Figura 49. Mail enviado por el programa	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estructuras con patologías graves en España.(G. Sevillano, 2018) ...	10
Tabla 2. Parámetros medidos por los sensores	31
Tabla 3. Tecnologías existentes	32
Tabla 4. Comparativa de las diferentes tecnologías de sensores,(Merchan et al., 2018)	33
Tabla 5. Dimensiones de los elementos del puente a escala.....	44
Tabla 6. Nomenclatura de los archivos generados en la adquisición de datos.	47
Tabla 7. Encabezado de los archivos generados por el sistema de adquisición de datos.....	47
Tabla 8. Registro de alarma	56
Tabla 9. Magnitudes físicas usuales en el Análisis de Estructuras.(Merchan et al., 2018).....	75
Tabla 10.Matriz de dimensiones de una estructura bajo carga estática(Merchan et al., 2018).....	78

1 INTRODUCCIÓN

La Monitorización de Salud Estructural (conocido por las siglas SHM, Structural Health Monitoring en inglés) se define como el proceso mediante el cual se registran periódica, continua o permanentemente las condiciones de una infraestructura mecánica, aeroespacial o civil de forma que se pueda implementar una estrategia de detección de daños.

El origen del SHM está en la industria aeroespacial (tanto en naves espaciales como en aviones) debido a la necesidad de monitorizar el estado de las mismas durante el vuelo para poder detectar cualquier tipo de fallo, para proteger las vidas humanas.(Martinez Trujano et al., 2016)

En los años 60 comenzaron a aplicarse métodos de pruebas dinámicas de vibración libre y forzada, para el estudio del comportamiento dinámico de las estructuras (principalmente de edificios) pero desde un punto de vista académico, ya que lo que se buscaba era la obtención de los periodos naturales de oscilación y el coeficiente de amortiguamiento.

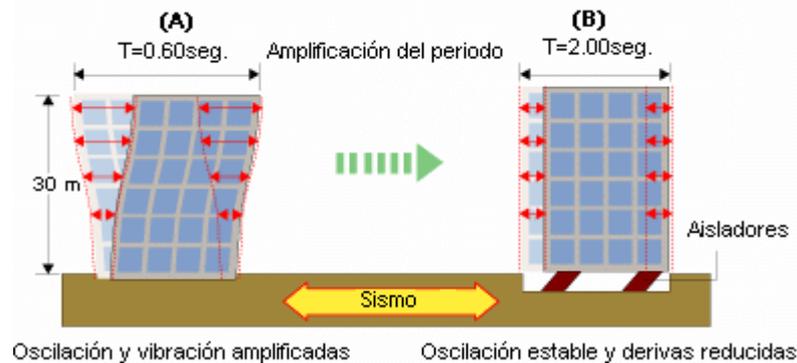


Figura 1. Periodo de oscilación en edificios

A finales del siglo XX, en un mundo cada vez más globalizado y una sociedad más dinámica, las necesidades básicas tales como el transporte, la seguridad y la vivienda constituyen un reto mayor en cuanto a la gestión de estos servicios.

Los avances tecnológicos e informáticos de comienzos han dado como resultado la instalación con éxito de sistemas de monitorización cada vez más sofisticados e integrados aplicados en todos los ámbitos de la vida.

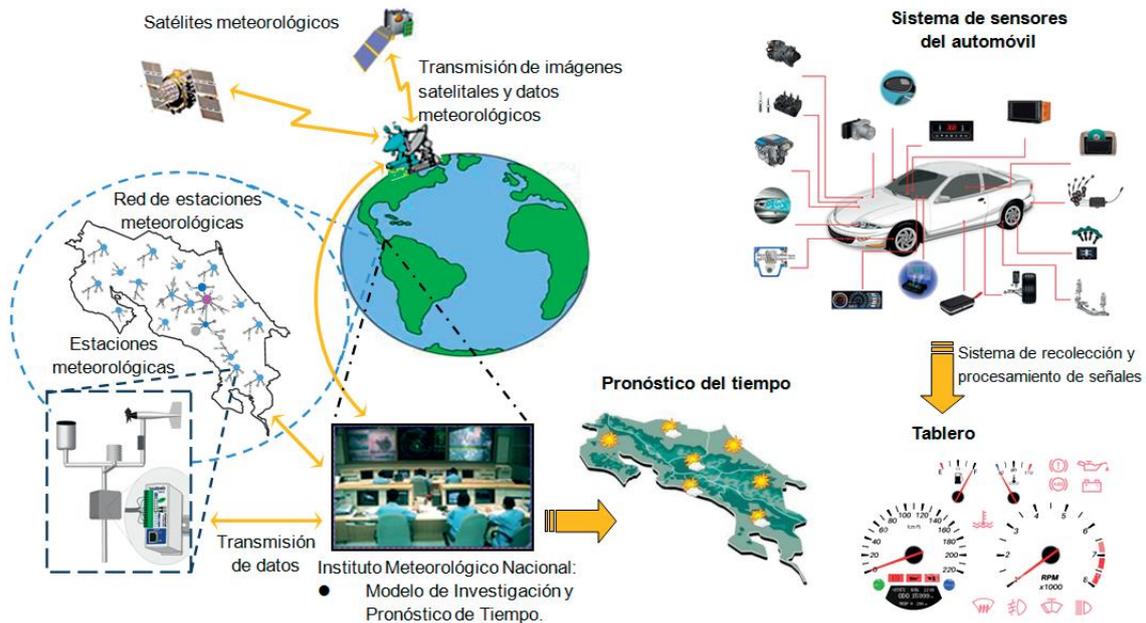


Figura 2. Ejemplos de sistemas de monitorización(Garita, 2016)

Todas las estructuras, incluyendo las instalaciones de infraestructura civil críticas como puentes y las carreteras se deterioran con el tiempo. Este deterioro se debe a varias razones, incluyendo fallos de fatiga causados por cargas de tráfico repetitivas, efectos de elementos ambientales, y eventos extremos como puede ser un terremoto. Si los daños permanecen sin ser detectados, la estructura puede tener un margen de seguridad mermado o algún problema de utilidad. En consecuencia, la integridad del sistema estructural tiene grandes posibilidades de fallo, lo que puede conllevar la pérdida de vidas y propiedades. Debido a la mayor preocupación por el estado de las estructuras existentes, en particular después de los terremotos; se comenzaron numerosos estudios sobre la detección de daños utilizando diversos métodos no destructivos de evaluación.

La supervisión de la salud estructural (SHM) supone implementar una estrategia de detección de daño. Este proceso implica la observación de una estructura a lo largo de un período de tiempo utilizando mediciones periódicas, la extracción de características de estas mediciones, y el análisis de estas características para determinar el estado actual de salud del sistema estructural. El resultado de este proceso es una valiosa información real sobre la capacidad de la estructura para continuar realizando su función mientras avanza el inevitable envejecimiento, acelerado en algunos casos por el ambiente en el que trabaja. Basado en el estado de la estructura tras la monitorización, se decide reparar, rehabilitar y/o fortalecer las estructuras de manera apropiada para mantener éstas en funcionamiento y poder alargar aún más sus vidas.



El costo de la vigilancia y la reparación es mucho menor que el costo de la reconstrucción de nuevas estructuras, por lo que la vigilancia es vital para las instalaciones de infraestructura civil, con lo que ello conlleva para la economía de un país. Países como Japón, EE. UU., China llevan años haciendo esfuerzos importantes para instrumentar puentes, edificios singulares y presas (Masato & Zhisen Wu, 1998).

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 MONITORIZACIÓN DE PUENTES

A raíz del desplome del puente Morandi en Génova (Italia), ha quedado patente la imperiosa necesidad de invertir en la vigilancia de puentes y obras de paso, así como en su mantenimiento. De forma que no se repitan accidentes como el ocurrido con las consecuencias a modo de pérdida de vidas humanas, y también desde el punto de vista económico por lo que puede suponer la pérdida de una vía de comunicación fundamental para un área.



Figura 3. Derrumbe del puente Morandi (Génova)

Los datos del Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana dicen que en todo el territorio español existen 22.500 obras de paso, las cuales han sido revisadas en los últimos 5 años. Estas revisiones consisten en una inspección visual que permita hacer una detección precoz de posibles defectos en la estructura que sean visibles y poder ponerles solución antes de que supongan un peligro para la integridad de la estructura. De las 22.500 obras de paso 66 tienen grandes deficiencias de seguridad, aunque ninguna tiene riesgo de desplome según el propio Ministerio. Éste posee una base de datos, el Sistema de Gestión de Puentes (SGP), en los que se detallan las inspecciones antes citadas incluyendo las posibles patologías, las medidas para solventarlas y fotos de los defectos estructurales.



Provincia	Carretera	Km.	Provincia	Carretera	Km.
A Coruña	N-634	697	Huelva	A-49	61
	N-634 (VS)	684		H-31	78
	FE-14	0		N-435	122
	FE-13	1		N-435	140
	FE-13	2	Jaén	N-322	125
Alicante	N-340	795	N-322a	125	
	N-340	795	León	A-6	294
Almería	A-7	485	A-66	150	
Asturias	N-632	109	N-120	436	
	N-630	89	N-536	3	
Barcelona	B-10	17	N-630	88	
Cádiz	A-7	104	Lérida	N-230	164
	N-4	677	Lugo	A-6	436
	N-340	45		A-6	437
	N-340	95		N-640 (VS)	26
	CA-33	6		N-640 (VS)	30
	CA-36	2	Málaga	A-7	164
	CA-36	5		A-7	140
	A-48	7		A-7	205
A-7	110	A-7		206	
		N-340		263	
Cantabria	N-623	97	N-340	300	
Castellón	N-340	989	N-340	301	
Ceuta	N-354	5	MA-20	4	
Córdoba	N-4	389	MA-20	4	
	N-432	318	Murcia	A-30	192
	N-432	327	Orense	N-541	30
Cuenca	N-3	190	Palencia	A-62	53
Gerona	N-2	778	A-62	55	
Granada	A-44	108	Sevilla	N-630	746
	A-44	108	Soria	N-111	188
	A-44	111	Teruel	N-211a	129
	A-44	111	Zamora	A-52	30
	N-432	416			

Tabla 1. Estructuras con patologías graves en España.(G. Sevillano, 2018)

En el caso de Estados Unidos son 231.000 los puentes que necesitan grandes reparaciones o deben ser reemplazados según la Asociación Americana de Constructores de Carreteras y Transportes (ARTBA), en base a los datos del inventario nacional de puentes (NBI) del Departamento de Transporte de EE.UU. que fue publicado en el año 2019. Esto supone el 37% de todos los puentes del país. De estos puentes

más de 46.000 presentan deficiencias estructurales, dentro de los cuales estaría el puente de Brooklyn. Otros 81.000 deberían ser reemplazados.

Como se ha comentado anteriormente, la vigilancia de la salud estructural en la mayoría del resto de países desarrollados (como es el caso de España) se caracteriza por la tradicional inspección visual junto con la referencia a los antiguos informes de inspección para mantener un registro exacto del estado de los puentes. En el caso de EE. UU. las evaluaciones estándar utilizadas por la Administración Federal de Carreteras se han limitado a pruebas e inspecciones visuales desde que se realizó por primera vez el Inventario Nacional de Puentes (NBI) hace casi 40 años. El NBI tiene sus raíces en la Ley Federal de Carreteras de 1968, que se promulgó tras el trágico derrumbe del Puente de la Plata en Ohio. (Joseph e, 2006), una excelente referencia que se lee como una historia de la inspección de puentes, describe la capacitación y los recursos proporcionados a los inspectores de puentes como parte de la iniciativa federal. El programa hace hincapié en las técnicas de inspección visual con manuales que proporcionan fotografías de los diversos tipos y grados de deterioro de los elementos de los puentes. Los inspectores de puentes están capacitados para identificar todos los tipos de deterioro, pero hay un componente subjetivo cuando se trata de la calificación de los puentes. El NBI utiliza un sistema de clasificación de cero a nueve para la calificación de la condición del puente a sistema para permitir la caracterización uniforme de la condición del puente. (Felipe et al., 2010) (Ahlborn et al., 2010)



Figura 4. Colapso del "Silver Bridge" (Ohio)

Los métodos tradicionales, costosos, lentos y subjetivos utilizados en la evaluación del estado de los puentes, que incluyen el sondeo por impacto, el arrastre en cadena, el potencial de media celda y el análisis del núcleo, están siendo sustituidos por técnicas más modernas. Se está investigando la utilización de técnicas de teleobservación y de redes de sensores robustas y permanentes en los puentes. Hasta 2005, unos 40 puentes de gran envergadura (100 m o más) en todo el mundo han sido equipados con sofisticados sistemas de instrumentación para la vigilancia de la salud estructural. Estos sistemas cuentan con una serie de sensores, distribuidos espacialmente. Están conectados en red, a veces de forma inalámbrica, e incorporan equipos que permiten la adquisición en tiempo real de cargas, los efectos ambientales, características estructurales y sus respuestas estáticas y dinámicas. A pesar de estas ventajas, las redes de sensores permanentes e “in situ” son costosas y pueden ser difíciles de instalar en algunos puentes o elementos de puentes, en particular cuando no se han tenido en cuenta durante la fase de construcción.

Se despliegan redes permanentes de sensores en los puentes con dos objetivos distintos: la generación de alertas para los administradores de los puentes y la visualización y análisis de datos estructurales continuos en tiempo real. Estos objetivos se logran mediante redes de sensores que hacen hincapié en dos factores concretos: la escala temporal del cambio y la gravedad del mismo.

2.2 ANTECEDENTES EN LA INSTRUMENTACIÓN DE PUENTES

Los orígenes de la monitorización estructural se remontan a finales del siglo XIX, época en la que el ingeniero George Shattuck Morison destacó por sus importantes avances, apoyados en principios científicos y en ensayos, cosa que no se hacía hasta el momento. Entre sus principales avances destacan los siguientes:

- Introducción de ensayos e inspección de materiales para asegurar el cumplimiento de sus especificaciones.
- Desarrollo de un manual para el diseño y construcción de puentes.
- Realización de informes de lo proyectado en obra.

El *Plattsmouth Bridge* fue uno de los primeros proyectos en los que se recoge un informe con los ensayos a tracción y compresión de los elementos prototipo del puente.

Sus obras más significativas fueron:

- Puentes sobre el río Missouri.
- El gran Puente de ferrocarril en Memphis.
- Viaducto en Iowa

En España el precursor de la instrumentación fue Eduardo Torroja. Investigó acerca de nuevas formas estructurales, como las láminas, realizando ensayos en modelo reducido y algunos ensayos en obras reales.

La monitorización tal y como la entendemos hoy en día, tiene sus orígenes en el auge de la construcción de infraestructuras en los años 80 y 90, lo cual suponía un número elevado de estructuras que debían ser conservadas durante su vida útil. En sus principios se utilizaban bandas extensométricas y sensores de fibra óptica.(Olazábal Herrero Patricia, 2013)

Las ventajas de los sensores de fibra óptica frente a las bandas extensométricas son los siguientes:

- Medidas absolutas con salida codificada espectralmente sin interferencias electromagnéticas
- Estabilidad a largo plazo
- Capacidad de multiplexión: instalación de varios sensores en la misma fibra óptica.
- Pequeño tamaño
- Posibilidad de introducirlos en el hormigón embebidos sin degradación

En sus inicios la instrumentación se realizaba en estructuras ya existentes en las que se detectaba mal funcionamiento. Se procedía de la misma forma que podría hacer un médico con un paciente:

- Detección de un mal comportamiento de la estructura
- Registro de la frecuencia con la que sucede el mal comportamiento
- Localización del daño
- Evaluación y cuantificación del deterioro
- Reparación

La monitorización comprende únicamente los 3 primeros pasos. Para el cuarto paso es necesaria la interpretación de los datos, y para el quinto la reparación de los fallos hallados.

El primer país que instrumentó puentes con sensores de fibra óptica fue Alemania a finales de los años 80. Se trataban de sensores muy primitivos en comparación con los que se utilizan actualmente. Por otro lado, esta monitorización no estaba informatizada; por lo que un ingeniero debía ir a recoger los datos al puente periódicamente. Más adelante se empezó a desarrollar un sistema de monitorización sin cables. Algunas de los primeros puentes instrumentados en Canadá fueron los siguientes:

- *Beddington Trail Bridge, Calgary 1992*: se emplearon sensores de fibra óptica tipo *Bragg grating* durante la construcción y la puesta en servicio



de la estructura. Antes de la ejecución del puente, se realizó un ensayo en un modelo a escala. 7 años después de su puesta en marcha, se realizó un ensayo estático y dinámico que certificaron que los sensores funcionaban correctamente.

- *Crowchild Trail Bridge*, Calgary 1997: debido al aumento de las cargas de tráfico, fue necesario hacer una comprobación del comportamiento estructural de los puentes existentes que habían sido calculados para cargas inferiores. Algunos de ellos fueron reforzados, como es el caso de este puente; basándose en un ensayo de laboratorio realizado en la Universidad de Manitoba. Con el objetivo de comprobar el comportamiento del puente reforzado, éste fue instrumentado.

En el año 1999 ya estaba instalado el sistema SOFO de monitorización, que consiste en la instrumentación mediante sensores de fibra óptica. Estos sensores pueden ser colocados embebidos en el hormigón o sobre superficies metálicas. Su longitud va desde los 20 centímetros hasta los 30 metros, y son capaces de medir deformaciones de un 1% en alargamientos y 0,5% en acortamientos. Suele ser necesario combinar estos elementos con termómetros e indicadores de tensión. (García-Sánchez, 2016)

Hasta principios de milenio la instrumentación de estructuras se realizaba únicamente cuando se detectaba algún daño puntual en la estructura, salvo en el caso de presas que se monitorizan para su control tenso-deformacional. Se implementaba durante un corto espacio de tiempo, suficiente para detectar el problema estructural y repararlo.

Entre los años 2000 y 2002, Casas y Gettu llevaron a cabo un trabajo de investigación dentro del Programa Nacional de Tecnologías Avanzadas de la Producción denominado “*Estructuras inteligentes. Desarrollo de un sistema de monitorización y control aplicación a los puentes*”. Los objetivos del estudio fueron los siguientes:

- Detección de daños en una estructura mediante un sistema de sensores.
- Supervisión experta de un puente.
- Control activo de una estructura.

En ese estudio se comprobó la fiabilidad del uso de sensores de *Bragg grating*, que se podían tanto embeber en hormigón como colocar en superficie metálica, como se ha mencionado anteriormente. En aquel momento se estaban llevando a cabo diversas investigaciones sobre distintos tipos de sensores. En Japón se desarrolló un sensor con fibras de vidrio y carbono que era capaz de medir los cambios de tensión en el mismo a partir de las variaciones de resistencia eléctrica en las distintas fibras. A su vez, en Estados Unidos se desarrollaron diferentes sensores inteligentes que eran capaces de verificar un comportamiento adecuado de materiales compuestos, mediante

el uso de partículas magnetoresistivas de tamaño microscópico. Aun así, hoy en día, los materiales básicos utilizados en estructuras siguen siendo el acero y el hormigón; sin que se hayan implantado todavía los materiales compuestos.

En un ámbito internacional se había empezado tiempo antes; habiéndose publicado en el año 2001 en Japón un artículo que resumía el sistema de instrumentación de puentes. Por otro lado, para el año 2007 había 6 puentes de grandes luces en Corea instrumentados que llevaban en marcha más de 10 años.

En el año 2002 Dewolf, Lauzon y Culmo, publicaron un artículo que describía la monitorización realizada en diversos puentes en Estados Unidos, llegando a la conclusión de que este era el sustituto a la inspección visual que se había hecho realizado entonces. Se realizaron dos tipos de instrumentación principalmente:

- Estudio deformaciones: dirigido al análisis de la figuración ir los problemas de fatiga relacionados con la misma.
- Estudio de vibraciones: encaminado al análisis de la rigidez y la funcionalidad de las estructuras.

En los primeros años del nuevo siglo surge una nueva aplicación de los sensores de fibra óptica y, por consiguiente; de la instrumentación: la comprobación del comportamiento de diferentes materiales compuestos. Existen varias ventajas respecto a los sensores tradicionales:

- Facilidad de instalación y manejo
- Peso ligero
- Alta resistencia a tracción combinada con alta flexibilidad
- Gran protección frente a corrosión

En este sentido, son ampliamente utilizados en la reparación de estructuras adheridos al hormigón de la estructura reparar. También se utilizan como un nuevo material prefabricado: matriz+fibras.

En el año 2003 se funda la *International Society for Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure*. Ese mismo año cómo Chang, Flatau y Liu publicaron un artículo en el que resumían las diferentes técnicas de instrumentación estructuras. Cómo se ha comentado previamente hasta el momento la monitorización de estructuras iba dirigida a la detección de posibles anomalías en las mismas y se realizaba posteriormente a su puesta en servicio. La mayoría de los métodos consistían en:

- Búsqueda de variaciones en las frecuencias propias con la forma de los modos de vibración.
- Determinación de longitud y de la situación de las fisuras a partir de un cambio en la frecuencia natural de la estructura.
- Análisis de la variación de la matriz de rigidez.

En aquel momento comenzaron a aparecer nuevos sensores:

- MEMS, sistemas micro electromagnéticos: acelerómetros fundamentalmente.
- NMR, resonancia magnética nuclear: cápsulas que detectaban la presencia de iones de cloro.
- LIDAR, Tecnología de infrarrojos: capaz de detectar la posición en 3D de determinados objetos.

Aun así, estos sensores dirigen la instrumentación hacia un fallo estructural específico, por lo tanto, no son capaces de evaluar el estado global de la estructura.

Otras técnicas son las siguientes:

- Rayos X y gamma: son capaces de obtener imágenes interiores de la estructura siempre que sean accesibles por el exterior como por el interior.
- Tecnología Radar
- Sensores de fibra óptica: en su momento tenían los inconvenientes del cableado, de su necesaria instalación durante la construcción y del coste del manejo el gran número de datos que aportaban.
- Sensores sin cables: requieren baterías que tengan una duración determinada salvo que éstos sean exteriores y pueden ser alimentados mediante energía solar. únicamente son válidos para excluir locales siendo inservibles durante la construcción y la vida útil de la estructura.

En el año 2005, Farhey realizó un artículo acerca del diagnóstico estructural en puentes. Este estudio tiene como origen el mal estado de las estructuras En Estados Unidos al cabo de los primeros 20 años de su puesta en servicio. En un primer lugar, describe el proceso inicial de identificación y evaluación de una estructura el segundo lugar, explica cómo se mantienen los puentes en Estados Unidos ya que como se ha comentado previamente la conservación recae en los diferentes Estados que lo componen y se trata de un inventario. Por último, cómo describe los distintos tipos de ensayos no destructivos que se realizan:

- Ensayos puntuales:
 - Cargas estáticas
 - Cargas móviles
- Monitorización continua
- Ensayos preliminares: consiste en la realización de una prueba en la estructura antes de su puesta en marcha. Este ensayo se repetirá a lo largo de los años y se comparan los resultados para poder evaluar un posible daño estructural. Su aplicación más directa es la obtención de los modos y frecuencias de vibración.

Por otro lado, Farhey también hace un análisis acerca de la distinta disposición de los sensores en una estructura:

- Adheridos: pueden colocarse en cualquier momento y ser sustituidos. Por otro lado, generalmente no están ubicados en el punto exacto de la medición y están sometidos a los agentes atmosféricos.
- Embebidos: sus ventajas radican en que están protegidos frente a agentes atmosféricos y están ubicados en el punto exacto la medición, y su inconveniente; qué tienen que ser colocados durante la construcción de la estructura.

Farhey señala también el frecuente mal funcionamiento y la necesaria recalibración de los sensores a lo largo del tiempo.

La instrumentación no tiene que ser llevada únicamente a cabo por sistemas complejos, como es el caso del Puente Largo de Aranjuez; en el que tras una serie de nivelaciones topográficas cada 4-6 meses se pudo demostrar que el asiento que sufría había llegado a estabilizarse.

Una de las ventajas de la monitorización es su bajo coste el material (sensores como cableado y equipo de adquisición de datos) frente al equivalente en mano de obra especializada instalada permanentemente la estructura.

Inaudi realizó en el año 2009 la revisión de 40 puentes que habían sido instrumentados en los últimos 15 años en distintos países. Inaudi afirmaba que la vida útil de cada estructura estaba lejos de ser monótona y predecible. Su evolución dependía de muchos conocimientos inciertos internos y externos. Mediante la instalación de sensores qué median los parámetros estructurales más relevantes, así como de las características medioambientales más importantes; era posible llegar a obtener una visión del estado y de la evolución de la estructura. De esta forma es cómo la monitorización estructuras se ha asentado como una nueva herramienta complementaria a los tradicionales métodos de inspección y modelización

En resumen, la instrumentación de estructuras permite:

- La detección de posibles daños en la misma a lo largo del tiempo.
- Estimar los efectos producidos por cargas exteriores
- Conocer la vida útil de la estructura
- La proyección de estructuras más esbeltas, fiables y eficientes

2.2.1 Tipos de monitorización

Las diferentes estrategias utilizadas para la monitorización de estructuras se clasifican en tres tipos: monitorización continua, la monitorización puntual y la monitorización de la integridad estructural.

2.2.1.1 Monitorización continua

La monitorización continua supone dejar colocados instrumentos en la estructura de forma permanente como puede ser el caso de sensores de fibra óptica, los cuales quedarán adheridos o embebidos en la estructura y no serán susceptibles de volver a ser utilizados.

Este tipo de monitorización se compone de 3 etapas:

- Evaluación preliminar, construcción y calibración del modelo de elementos finitos del puente. En esta etapa es necesario identificar la tipología del puente, así como sus necesidades de monitorización. Los sensores a utilizar y el sistema de transmisión de datos adecuado, todo ello teniendo en cuenta sí es realmente posible su instalación. Es fundamental la construcción del modelo de elementos finitos, el cuál debe ser validado por medio de técnicas de identificación de sistemas (acelerómetros, pruebas dinámicas..., para poder ser lo suficientemente exacto como para representar y poder predecir el posible comportamiento del puente real ante las diferentes cargas que sufrirá en su vida útil; de forma que se puedan identificar las zonas críticas en los que se deberán instalar los sensores ante distintos escenarios de cargas.
- Instalación de los instrumentos de medición y sistema de adquisición de datos: Una vez localizados los puntos críticos a monitorizar y las variables a medir se deberán instalar los instrumentos de medición siempre que sea posible teniendo en cuenta sus necesidades de mantenimiento o sustitución de sensores en caso de fallo. Deberá tenerse en cuenta cuál será la fuente de energía tanto para el sistema como para los sensores colocados en el puente.
- Procesamiento administración de datos e interpretación de los mismos: esta cantidad de datos obtenidos mediante un amor mediante la monitorización continua deberán ser correctamente manejados y almacenados. Para ello se deberá implementar un software de análisis.

Este tipo de monitorización precisa tanto de métodos globales como locales y la implementación de técnicas detención de daño. Las técnicas de monitorización globales

estarán basadas en vibraciones y propagación de ondas, de forma que el tráfico no se vea interrumpido. Estos métodos globales permiten ver el estado de la estructura mediante la comparación de diferentes escenarios de daño a través de la respuesta dinámica de la estructura obtenida mediante los diferentes instrumentos y la respuesta del modelo de elementos finitos.

Los métodos locales como las mediciones de deformaciones unitarias en cierto elemento, el asentamiento de las pilas, temperatura...requieren la identificación en la primera etapa de los puntos críticos de la estructura, de forma que sean esos puntos los controlados.



Figura 5. Acelerómetros y extensómetros instalados en puente

2.2.1.2 Monitorización puntual

Este tipo de monitorización está basada en las pruebas de carga que se realizan en los puentes. Estas pruebas cobran importancia cuando hay partes estructurales dañadas, en las cuales es complicado cuantificar los efectos del deterioro o merma en la capacidad del puente y en la distribución que resulta de las cargas. Otra de las utilidades es la de poder comprobar después de una reparación o refuerzo la eficacia de éstos, pudiendo observar el comportamiento real del puente.

Existen dos tipos de pruebas de carga:

- Prueba de carga estática: el objetivo de estas pruebas es cerciorarse de que la construcción de la estructura se ha llevado de forma satisfactoria respecto a lo proyectado. Es obligatorio para puentes de más de 12 metros, siendo las solicitaciones del tren de carga real aproximadamente el 60% de las solicitaciones del tren de carga de la Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP). Las magnitudes a cuantificar y los instrumentos mediante los cuales se realizan las mediciones son los siguientes:
 - Respuesta estructural

- Flechas → Transductores de desplazamiento
- Giros → Clinómetros
- Deformaciones → Extensómetros
- Curvatura → Extensómetros
- Esfuerzos → Células de carga
- Condicionantes atmosféricos
 - Temperatura → Sondas de temperatura
 - Humedad → Higrómetro



Figura 6. Prueba de carga estática.(Gaute Alonso, 2019)

- Prueba de carga dinámica: el objetivo de este tipo de prueba es la obtención de información de la estructura que no puede sacarse de pruebas de carga estática. Se trata de pruebas de tipo obligatorio para puentes de más de 60 metros o que tengan un diseño singular o empleen materiales novedosos; así como pasarelas en las que las vibraciones puedan ser perceptibles por los usuarios. La información obtenida en estas pruebas es la siguiente:
 - Acelerogramas
 - Espectros de frecuencia
 - Modos de vibración

- Factor de amortiguamiento estructural
- Coeficientes de impacto

Para ello se excita la estructura con un camión avanzando a velocidad constante a lo largo del eje del tablero a las siguientes velocidades:

- Velocidad lenta $\leq 5\text{km/h}$ (prueba cuasi-estática)
- Velocidad media 30-40 km/h
- Velocidad rápida $> 60\text{km/h}$

En el caso de querer comprobar la excitación de los modos de torsión el vehículo circulará por un lateral del tablero. Otro tipo de prueba consiste en hacer pasar un camión a distintas velocidades por encima de un tablón *rilem* de forma que provoque una amplificación de la vibración en el puente.



Figura 7. PCD con tablón *rilem*.(Gaute Alonso, 2019)

2.3 MONITORIZACIÓN DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL (SHM)

2.3.1 Objeto de cálculo

El diseño e implementación de un sistema efectivo de SHM es un proceso que debe seguir una secuencia lógica de pasos y decisiones. Es necesario realizar un análisis previo de las necesidades reales, en función de las tecnologías disponibles que se quieran utilizar. Las nuevas tecnologías pueden funcionar bien desde el punto de vista técnico, pero suelen proporcionar información que es difícil de analizar o que es difícilmente utilizable para utilizarla como factor de decisión a la hora de gestionar las estructuras.

En la siguiente figura se muestra el diagrama de flujo del proceso de cálculo del sistema de SHM:

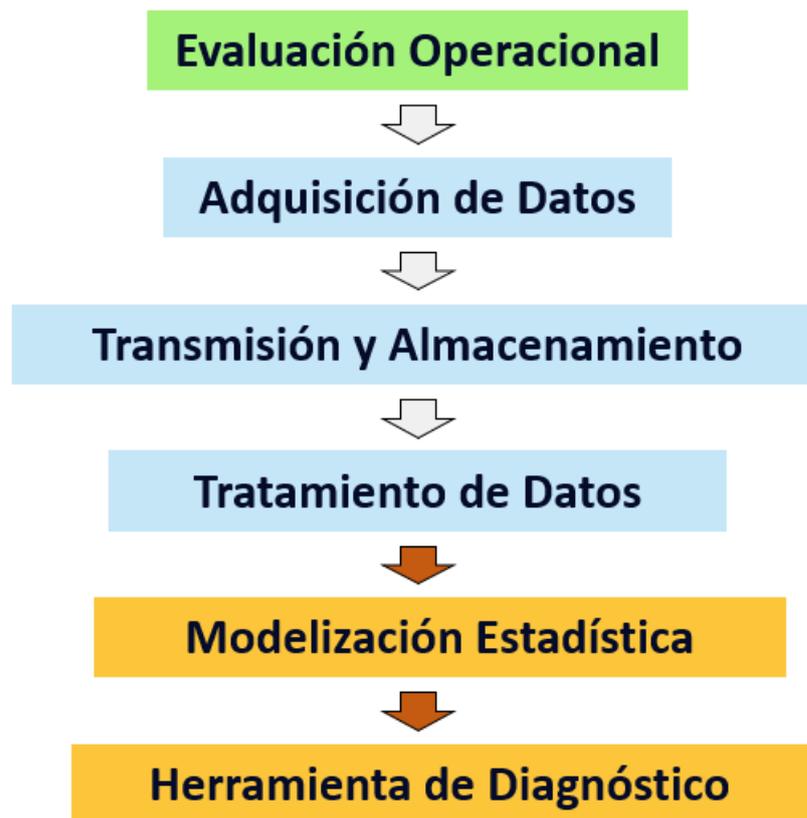


Figura 8. Proceso de cálculo de un sistema SHM

A continuación, se exponen los pasos a seguir para obtener una implementación óptima de un sistema de SHM en una estructura cómo convirtiéndolo en una potente herramienta para el control de la salud estructural de la misma.

2.3.1.1 Evaluación operacional

La evaluación operacional está clasificada en dos fases. La primera consiste en la identificación de estructuras a las que realizar un seguimiento y la segunda consiste en la realización de un análisis de riesgo y respuesta estructural.

1. Identificación de estructuras para su seguimiento

Antes de llevar a cabo la implantación de un sistema de SHM, es importante seleccionar una estructura en la que se pueda sacar el máximo rendimiento del mismo. Varias posibles situaciones en las que puede ser interesante y beneficioso la utilización de un sistema de SHM son las siguientes:

- Estructuras nuevas que incluyan diferentes aspectos innovadores ya sea en su diseño, procedimiento de construcción o materiales utilizados.
- Estructuras nuevas que tengan riesgos o incertidumbres asociadas poco comunes cómo pueden ser condiciones geológicas hostiles, riesgo sísmico, riesgos de carácter meteorológico, ambientes de trabajo agresivos, vulnerabilidad durante el proceso de construcción, calidad de los materiales y mano de obra.
- Estructuras que se consideren críticas a nivel de red, debido al fuerte impacto qué tendrían los usuarios y en el resto de las infraestructuras de la red en caso de fallo.
- Estructuras nuevas qué pueden ser representativas de una población de estructuras similares, de forma que la información obtenida en ésta; puedo hacer extrapolada al conjunto de la población.
- Estructuras existentes en las que se hayan detectado deficiencias a partir de inspecciones visuales.
- Estructuras que estén pendientes de ser reemplazadas o renovadas. El sistema de SHM se utilizaría para analizar la necesidad real en estas actuaciones y poder optimizar el diseño y ejecución de la renovación

2. Análisis de riesgo y respuesta estructural

El encargado de diseñar un sistema de SHM, los ingenieros de diseño y los ingenieros al cargo de la evaluación estructural, así como el propietario de la estructura; deben identificar los riesgos que estén asociados a la misma y la posibilidad de que ocurran. El análisis de riesgo contemplará posibles sucesos y fallos que puedan afectar de algún modo la estructura.

Varios posibles ejemplos de riesgos en una estructura son la corrosión, la pérdida de pretensado, deslizamientos, fallo en la cimentación, terremotos, cargas no

calculadas, impactos, un modelo de elementos finitos impreciso como material de construcción de baja calidad o una ejecución inadecuada de la estructura.

Estos riesgos serán jerarquizados adecuadamente en función de la gravedad y probabilidad de cada uno. Algunos riesgos podrán ser descartados por su nulo impacto o probabilidad como quedándose únicamente con los principales riesgos a considerar en el sistema de SHM.

Para cada riesgo seleccionado se asociará una o más respuestas que podrían observarse de forma directa o indirecta, en caso de que se dé ese riesgo. Un ejemplo puede ser la corrosión que producirá un cambio en la composición química de los materiales y una reducción en la sección. Si este factor no se tiene en cuenta a la hora de modelizar la estructura en elementos finitos, las diferencias entre la respuesta de la estructura del modelo serán inadmisibles.

Es por ello necesario cuantificar las respuestas y escoger los sensores que tengan las especificaciones adecuadas al caso, de forma que sea posible determinar qué respuestas pueden ser revisadas mediante inspección visual y cuáles deben ser instrumentadas. Es importante también identificar la posición dónde es más probable que ocurran estas respuestas, ya sean en los elementos críticos como la posición dentro de estos elementos.

Como resultado este análisis, obtendremos una lista de respuestas que precisan ser detectadas, medidas, localizadas y la amplitud estimada de las mismas.

2.3.1.2 Adquisición y transmisión de datos

Se trata de una fase fundamental dentro del proceso de SHM debido a su gran impacto en la capacidad del sistema y a qué constituye la fuente de información para las siguientes fases.

Los sistemas de adquisición, transmisión y almacenamiento de datos están formados por los siguientes componentes:

- **Sensores y actuadores:** son los dispositivos que se colocarán en contacto directo con los diferentes elementos y materiales de la estructura, cuya función es la medición de alguna característica: temperatura, deformación, inclinación... En el caso de sistemas activos, los actuadores introducen una excitación conocida la estructura con el objetivo de monitorizar su respuesta. Estos dispositivos pueden convertir las variaciones de una magnitud física (deformación, tensión, inclinación) de lectura directa variaciones de una magnitud eléctrica, a través de una señal de salida que estará en función de la magnitud medida por medio de convertidores analógico-digitales. En función del tipo de daño que se

necesita identificar y de la tipología de los sensores que se instalen, la relación entre la medición y la presencia de daño será mejor.

Hoy en día existe una amplia gama de sensores, ya sea los de fibra óptica, piezoeléctricos y eléctricos, galgas de esfuerzo o sensores láser. Es recomendable introducir sensores de varias tecnologías de forma que se complementen las mediciones para garantizar una mayor fiabilidad en los datos.

- Sistema de adquisición de datos (SAD): se trata del elemento encargado de recibir las medidas realizadas por los sensores mediante un software informático que las procesa como almacena y transmite. Está formado por un ordenador y el cableado que lo conecta con los sensores. Debe poseer una fuente de alimentación continua. Los datos pueden ser almacenados manualmente, semi -automáticamente o automáticamente, en el sitio o de forma remota, estática o dinámicamente y de forma continua o periódica.

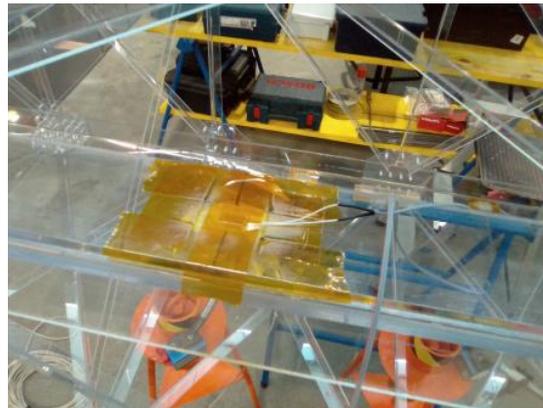


Figura 9. Sensores cableados del puente de laboratorio de Tecnalia.

Hoy en día cómo la transmisión inalámbrica se está consolidando como la técnica con mayor impacto en el ámbito de la monitorización estructural. Este tipo de monitorización surgió el para sustituir los sistemas convencionales de transmisión por cable ya que la comunicación alámbrica carece de los problemas del sistema convencional (exceso de cables, deterioro de la señal largas distancias de transmisión y daño la instrumentación). Por otro lado, las redes inalámbricas ofrecen un entorno de computación distribuido, que permite extender las capacidades de análisis en los modos de medición de forma que se pueda hacer un diagnóstico multi -escalonado y la toma decisiones sea fundamentada.



- Programa de control del sistema: se trata de un software diseñado para el procesamiento, análisis y presentación de los datos.

Los sistemas de sensores y almacenamiento de datos deben estar protegidos de las condiciones ambientales cómo de la posible interferencia humana. Existe la posibilidad de que ocurran fallos por suministro eléctrico como por lo que será necesario poseer una fuente secundaria de electricidad o tener capacidad de poder reactivar automáticamente el sistema. Las unidades de adquisición y almacenamiento deberán disponer de la suficiente memoria RAM y espacio en discos duros para poder acumular todos los datos.

Esta fase termina con un ensayo de validación in situ. se dispondrá de un documento de diseño en el que se incluirán una lista con los sensores y demás aparatos, planos de instalación y cableado cómo procedimiento e itinerario de instalación y presupuesto.

2.3.1.3 Tratamiento de datos

Para convertir información útil los datos obtenidos, se deberá someterlos a una fase de tratamiento formada por 4 etapas:

- Sincronización: los datos deben estar sincronizados y ordenados para su análisis. Es necesario que las referencias temporales sean idénticas para todos los datos y a cada valor temporal le corresponde a un valor de registro. Se deberá tener en cuenta el posible retardo entre los diferentes dispositivos a la hora de elegir las frecuencias de muestreo, de forma que se asegure una secuencia cronológica de la información; ya que los datos poder estar repartidos entre varios dispositivos. Es necesario también tener en cuenta los diferentes formatos en los que pueden registrarse los datos, que serán gestionados mediante procesos de normalización.
- Exploración: los sensores dan muchos datos y es necesario poder identificar variables van a ser útiles para optimizar el almacenamiento, de forma que se seleccionen los registros más importantes.
- Estructuración: se deben organizar los datos para que se puedan consultar independientemente del estudio.
- Procesamiento de la señal: se trata de uno de los elementos más importantes dentro de esta fase. Conlleva la realización de las operaciones: normalización y depuración.

La normalización es necesaria para simplificar los datos recogidos bajo diferentes condiciones, separando los efectos que puedan haber sido provocados por las condiciones ambientales y operativas.

La normalización incluye:

- Procedimientos para eliminar características indeseadas de los datos como tendencias ruido.
- Filtrados y re-muestreos.
- procedimientos de selección de parámetros antes de continuar con el análisis.

El filtrado elimina ciertas partes de los datos que estén contenidos dentro de algún rango de frecuencias. Estas operaciones pueden llevarse a cabo en dominios temporales, frecuenciales o espaciales. Algunos filtros se utilizan también para eliminar el ruido. El re-muestreo suele emplearse para suprimir un rango de frecuencias de los datos registrados. Las mediciones de mala calidad como consecuencia de fallos en el montaje de sensores con el hardware partición de datos podrán ser rechazadas antes o después del procesamiento en base a un juicio de expertos. Las mediciones que estén lejos de valores esperados se denominan valores atípicos y pueden ser eliminadas mediante análisis estadístico.

2.3.1.4 Extracción de parámetros característicos

En esta parte del proceso se identifica la información presentan los datos que permite distinguir de la forma más clara posible el estado no dañado respecto de cualquier situación del año que experimenta la estructura, pudiendo limitar la dimensión de la información utilizada de forma que se facilite las posteriores tareas.

Un parámetro que sea sensible al daño puede proporcionar información útil para la detección de daños a partir de las mediciones de la respuesta estructural. Existen varios métodos para encontrar sus parámetros cómo normalmente se hace por comparaciones entre modelos analíticos experimentales expresen magnitudes comparativas de algunos parámetros del modelo. Los modelos precisos de elementos finitos pueden ser utilizados para introducir posibles defectos estructurales mediante simulación computacional cómo de forma que se obtenga la respuesta del sistema dañado y poder detectar qué parámetros son más sensibles a esos daños inducidos.

Hay parámetros simples, como parámetros estadísticos (valor máximo como medio, raíz media cuadrada) que pueden ser empleados para detectar fallos graves. Sin embargo, para poder detectar de forma temprana algunos pequeños rayos sin desarrollar se necesitan parámetros más complejos cómo que se obtienen mediante el procesamiento de señal avanzado.

La cantidad de parámetros seleccionados afecta la complejidad de la técnica de detección y la posterior interpretación de la información, por lo que es recomendable reducirlo en la medida de lo posible. Este trabajo puede dejarse a cargo del juicio ingenieril de expertos en la materia, aunque existen técnicas matemáticas fiables de reducción dimensional de datos, como el análisis de componentes principales.

El resultado de esta fase del proceso, será un conjunto reducido de datos a partir del cual se construirá la referencia para la aplicación del algoritmo de reconocimiento de patrones encargado de la asignación de un estado a cada medición hecha sobre la estructura.

2.3.1.5 Modelización estadística

Para la detección de daños estructurales se debe buscar una relación funcional entre los parámetros seleccionados y el estado de salud estructural. Esta relación es difícil de obtener mediante procesos de análisis basados en la física y el comportamiento estructural debido a la gran cantidad de incertidumbres debidas al diseño como la construcción y el uso de la estructura. Es por ello frecuente utilizar modelos estadísticos que permitan detectar el daño a partir de técnicas de aprendizaje automático o “Machine Learning”.

El aprendizaje automático es una rama del conocimiento que consiste en construir relaciones computacionales entre varias magnitudes en base a los datos observados que se recogen en un algoritmo. Este algoritmo aprende las reglas computacionales a partir de una evidencia observacional que permite tomar decisiones. Estos algoritmos analizan distribuciones estadísticas de las mediciones de los parámetros y se agrupan en 3 categorías diferentes según la problemática a resolver:

- Clasificación: el resultado es un estado dentro de un conjunto discreto de posibilidades. Para poder aplicar esta técnica de forma general, todos los posibles estados deben ser delimitados. Para la localización del daño, la estructura se dividirá en varias subestructuras; de forma que el algoritmo pueda asignar el daño a una determinada su estructura.
- Regresión: este algoritmo proporciona como resultado una o más variables continuas con las que se relacionan las mediciones reales.
- Detección de anomalías: el resultado del algoritmo será un aviso de la presencia de datos atípicos en el registro continuo de datos, que podrá ser valorado como un potencial daño a la estructura. A este algoritmo solo se le pide indicar si los datos han sido tomados en una condición de operación normal o no. Es el problema de clasificación más simple, ya que sólo debe distinguir entre 2 clases o estados.

En función de la información disponible en el sistema de SHM, los algoritmos de “Machine Learning” se clasifican en dos grandes grupos:

- Aprendizaje supervisado: estas técnicas precisan de ser alimentadas del algoritmo con las sucesivas muestras de datos relativas a cada uno de los posibles estados de deterioro conocidos y se van modificando hasta que la salida coincide con las etiquetas de referencia. Se utilizan para

alcanzar niveles elevados de identificación del daño, pero son difíciles de implementar por la gran cantidad de información que precisan.

- Aprendizaje no supervisado: estas técnicas se limitan a proporcionar un nivel de conocimiento básico en la jerarquía identificación del daño. Sólo necesita información sobre el estado no dañado (de referencia) de la estructura para poder ser implementados.

El desarrollo de modelos estadísticos es un paso fundamental en un sistema de SHM, al constituir el punto de partida de la generación de algoritmos que trabajó con los parámetros característicos extraídos de forma que se pueda evaluar el estado estructural y detectar así la posible presencia de daños. Tras analizar las respuestas del sistema, el ingeniero podrá identificar la presencia de alguno de los riesgos previstos o si se han desarrollado signos de degradación en la estructura. De esta forma se podrán establecer protocolos de actuación que permitan responder a tiempo gracias a la detección temprana de fallos estructurales.

2.3.2 Etapas en el diagnóstico de la SHM

El diagnóstico de daños en los sistemas estructurales implica principalmente la identificación del daño, la posterior caracterización de su localización, tipo y severidad. Un sistema robusto de SHM estará formado por los siguientes niveles:

Nivel 1: ¿Existe un daño presente en la estructura? → DETECCIÓN

Este nivel solo proporcionará información acerca de la existencia de un daño en la estructura. En este punto de conocimiento, la realización de unas pocas mediciones de vibración podría ser suficiente para determinar la presencia de algún daño.

Nivel 2: ¿Dónde se encuentra ese daño? → LOCALIZACIÓN

El nivel 2 amplía el conocimiento sobre el daño detectado, dándonos su ubicación (una o varias), para lo que normalmente se emplea un modelo estructural.

Nivel 3: ¿Cuál es el tipo de daño detectado? → CARACTERIZACIÓN

El tercer nivel se encarga de caracterizar el tipo de daño presente en la estructura, considerando el daño como algún cambio introducido en el sistema; como puede ser ser algún tipo de grieta, una alteración de las condiciones de contorno o una modificación en las conexiones de los miembros estructurales.

Nivel 4: ¿Cuál es la gravedad del daño? → EXTENSIÓN

El nivel 4 nos permite estimar el tamaño o la extensión del daño y para ello es necesario que el modelo represente adecuadamente el efecto del daño sobre la estructura, por ejemplo, modificando la longitud de grieta o la reducción de la rigidez estructural. Si no es posible lograr este modelo, se tendría que realizar experimentos de calibración.



Nivel 5: ¿Cuál es la vida remanente prevista de la estructura?

→PRONÓSTICO

El último nivel se encarga de predecir la vida útil remanente de la estructura en base al conocimiento adquirido sobre el daño en la misma. Esto es lo que se conoce como nivel de pronóstico y es el resultado del desarrollo de las tecnologías de la SHM permitiendo una mejor comprensión de la progresión del daño. Este nivel requiere la combinación de un modelo estructural global junto con modelos locales de continua evolución del daño.

2.3.3 Parámetros medidos por los sensores

A continuación se enumeran los distintos parámetros que pueden ser monitorizados comúnmente en sistemas de salud estructural.

Parámetro medido	Características
Tensión	Mide la deformación como desplazamiento relativo de las partículas. Orígenes de las tensiones: <ul style="list-style-type: none"> • Carga • Temperatura • Humedad • Efectos largo alcance (contracción hormigón, relajación...)
Desplazamiento	Integración de una tensión sobre una base de medición mayor. Miden deformaciones totales.
Asientos	Caso especial para desplazamientos verticales. Pueden provocar inclinaciones y problemas en Estado Límite de Servicio (ELS) en estructuras
Temperatura	Papel fundamental en estructuras. Puede provocar expansión y contracción en los materiales. Medición necesaria para interpretar los resultados de otros sensores.
Inclinación	Forma de desplazamiento. Desviación de la alineación vertical/horizontal.
Carga/Fuerza/Presión	Cargas transferidas a la estructura en forma de fuerza y presión. Pueden medirse la fuerza en cables de



	suspensión o entre el contacto entre suelo/roca y estructura.
Presión del agua	Parámetro importante en geotecnia. Carga hidrostática sobre una estructura o presión de los poros con agua en un sólido saturado.
Aceleración	Parámetro importante en análisis dinámico de estructuras. Sirve para evaluar la respuesta dinámica de una estructura.
Cargas móviles	Se utilizan para medir las cargas de los vehículos sin tener que detenerlos. Evaluar la carga de tráfico.
Estaciones meteorológicas	Evaluar parámetros medioambientales: <ul style="list-style-type: none"> • Temperatura • Humedad • Velocidad y dirección del viento • Radiación solar
Sensores de ruido/polvo	Útiles durante la construcción para cumplir los niveles acordados.

Tabla 2. Parámetros medidos por los sensores

2.3.4 Tecnologías aplicadas en la SHM

Los parámetros comentados en el punto anterior pueden ser medidos mediante diversas tecnologías de sensores. Cada una de estas tecnologías presenta las ventajas que se van a exponer a continuación.

Tecnología	Características
Sensores Eléctricos (MEMS)	Miden el parámetro mediante un cambio de voltaje, capacidad o inductancia. Sistema de comunicación simple.



	Sensores económicos pero susceptibles a perturbaciones electromagnéticas.
Cables vibrantes	Miden el parámetro por un cambio de vibración de una tensión. Se trata de medidas muy exactas y estables. Muy utilizado en mediciones a largo plazo.
Fibra óptica	Miden el parámetro por cambios en la propagación de la luz en sus fibras. Muy duraderas, estables e insensibles a perturbaciones externas. Gran rendimiento a largo plazo y bajo coste.
Sensores de fibras distribuidas	Las fibras permiten distinguir diferentes posiciones del parámetro medido. Permite lecturas cada metro en distancias de hasta 50km de fibra. Muy útil para detectar y localizar sucesos.
Sensores remotos: ópticos/radar/laser	Útiles para monitorizar movimientos globales. Incluye métodos geodésicos tradicionales.
Técnicas basadas en satélites	Se basan en la observación de la tierra desde diferentes longitudes de onda. Abarcan zonas muy grandes y nos da información de la evolución en el pasado.

Tabla 3. Tecnologías existentes

2.3.4.1 Criterio de selección

En la siguiente tabla se hace una comparativa de los diferentes aspectos a valorar a la hora de elegir una tecnología para la monitorización.

	Coste Sensor	Coste Lectura	Precisión a Largo Plazo	Durabilidad	Densidad de Información
Eléctricos/MEMS	€€	€	Mala	Mala	Baja
Cable Vibrante	€€	€€	Buena	Media	Baja



Fibra Óptica	€€€	€€€	Buena	Buena	Media
Sensores de Fibras Distribuidas	€	€€€€	Buena	Buena	Alta
Sensores Remotos	€	€€€	Media	Media	Alta
Basados en satélites	N/A	€€	Media	Buena	Alta

Tabla 4. Comparativa de las diferentes tecnologías de sensores,(García-Sánchez, 2018)

2.4 SOFTWARE LABVIEW

2.4.1 Introducción

LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) es un software orientado a desarrollar aplicaciones para instrumentación mediante programación gráfica basado en Lenguaje G. Posee una serie de librerías para comunicación por instrumentos electrónicos, con tarjetas de adquisición de datos, sistemas de adquisición y acondicionamiento y comunicaciones en redes.

Los programas que se realizan en LabVIEW se denominan instrumentos virtuales, o Vis como se les nombrará más adelante cuando se desarrolle el programa completo de adquisición de datos. Se trata de una forma de programación en bloque muy visual, que nos permite utilizar múltiples herramientas, funciones de cálculo, gráficas, filtrado de señales, indicadores de nivel, termómetros...

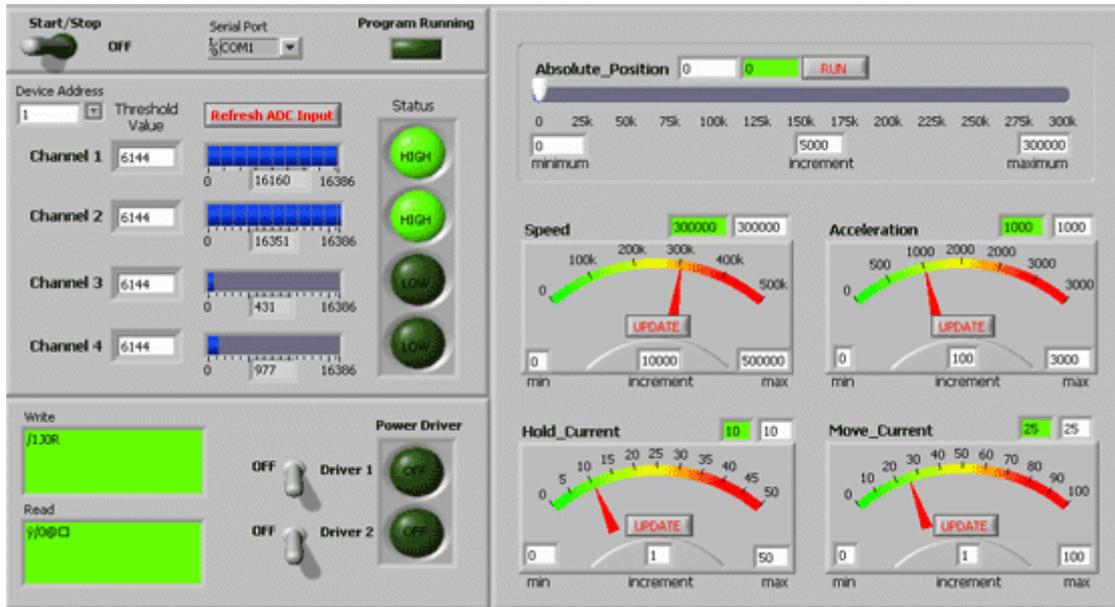


Figura 10. Ejemplos de visualización LabVIEW

Los Vis se dividen en dos partes. La primera es una interfaz interactiva llamada panel frontal, que viene a simular el panel de un instrumento real. En este panel se introducen los datos mediante el teclado o el ratón y se pueden obtener los resultados de forma visual.

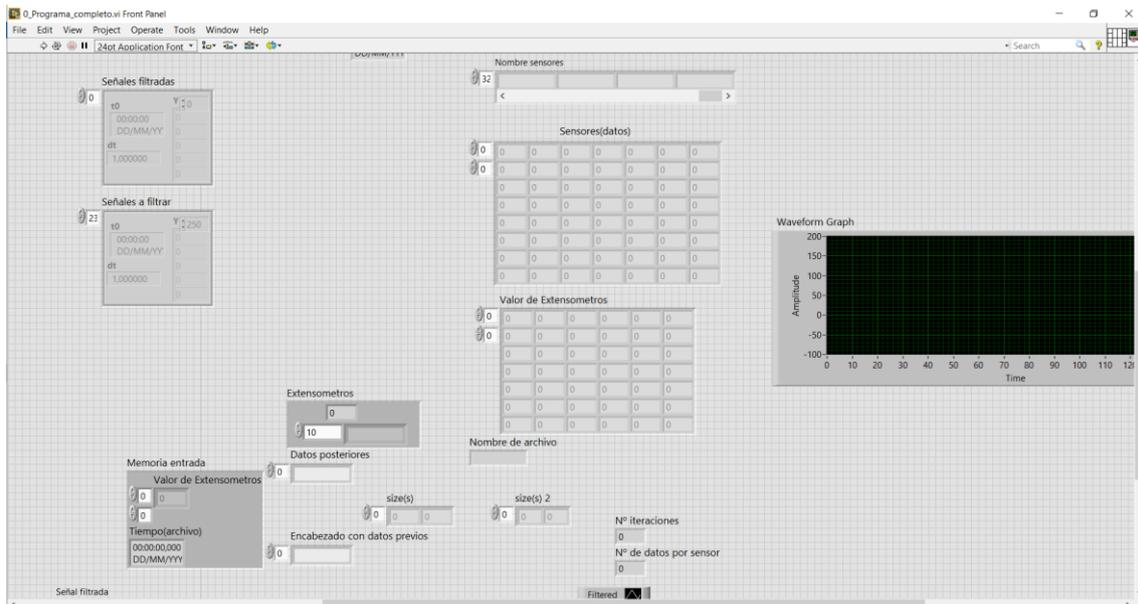


Figura 11. Panel frontal de la aplicación

La segunda parte se trata de un diagrama de bloques construido el lenguaje G, que aporta una solución gráfica al problema de programación. Este diagrama de bloques es el código fuente de cada VI. En el caso de este programa existe un módulo completo VI, compuesto de varios submódulos a los que se les denominará subVI, que trabajarán de forma coordinada para conseguir el objetivo.

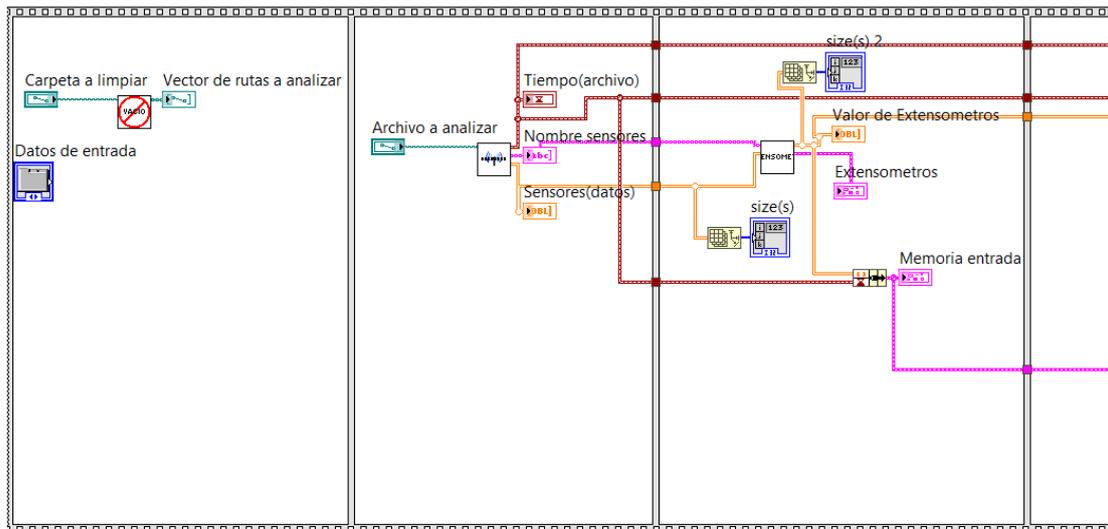


Figura 12. Diagrama de bloques del programa

LabVIEW es conocida como una herramienta desarrollo utilizada entre sistemas de adquisición de datos y control de instrumentos de forma sencilla y rápida. Es utilizada en el desarrollo de pruebas, mediciones, control de procesos, automatización, monitorización y simulación.

Entre sus ventajas destacan las siguientes: conectividad con diferentes instrumentos, capacidad de adquisición de datos, flujo de datos sencillo basado en la interfaz gráfica, además de múltiples funciones previamente configuradas.

2.4.2 Análisis en línea

El análisis en línea consiste en analizar los datos dentro de la propia aplicación en la cual se están adquiriendo. Esto se da en aplicaciones en las cuales se toman decisiones en tiempo real y los resultados tiene una consecuencia directa en la misma toma en modo de cambio de parámetros o ejecutando algún tipo de acción. Es importante buscar un equilibrio con los datos adquiridos ya que una gran cantidad de estos puedes requerir de mucha capacidad computacional y mermar el rendimiento de la aplicación.

En ciertos casos es necesario tener aplicaciones con cierta autonomía para tomar decisiones, lo cual se proporciona mediante algoritmos de análisis conocidos como “Machine Learning”.

Las decisiones que se basan en la adquisición de datos no siempre se toman de manera automática. En ciertas ocasiones es necesario revisar la ejecución del proceso y determinar si el funcionamiento es correcto o si debe ajustarse algún parámetro. A veces estos cambios se dan mientras la aplicación está en marcha, por lo tanto, la aplicación debe manejar los datos que provengan del proceso para posteriormente ser manipulados, simplificados y cambiados de formato para ser presentados de una forma más útil para el usuario final.

LabVIEW ofrece rutinas de análisis para ejecuciones de punto por punto, las cuales están diseñadas para cumplir con las necesidades de análisis en línea en aplicaciones en tiempo real. Estas rutinas punto por punto pueden no ser adecuadas para ciertas aplicaciones por lo que el usuario deberá considerar su idoneidad.

Este análisis es necesario cuando se manejan procesos de control en los que está presente la velocidad, determinismo y la adquisición de datos punto por punto. El acercamiento al punto por punto hace más simple el diseño, implementación y procesos de pruebas al ser el flujo de la aplicación muy similar al flujo natural de los procesos que la aplicación están monitorizando.

Existen aplicaciones también que no necesitan que los resultados sean obtenidos en tiempo real para tomar decisiones durante el proceso punto el objetivo de estas aplicaciones es identificar la causa y efecto de las diferentes variables que pueden afectar al proceso. Estas aplicaciones requieren importar datos de archivos binarios personalizados tipo ASCII o bases de datos comerciales.

Una vez importados los datos se pueden realizar múltiples rutinas de análisis disponibles, así como manipular los datos y arreglos diferentes formatos. LabVIEW Proporciona múltiples funciones para acceder a cualquier formato de archivo y bases de datos conectándose con herramientas de informe.

2.4.3 Reducción de la información a analizar

Al realizar el análisis en línea, la cantidad de información obtenida puede no ser tratada en su totalidad de forma que se acumule una gran cantidad de información que ocupe un gran espacio. Es una tarea fundamental el poder comprimir esta información de forma que no se pierda su utilidad.

Mediante ciertas herramientas de LabVIEW, la cantidad de datos puede reducirse de manera significativa y pueden ser cambiados de formato para que su manejo y almacenamiento sea más simple, de forma que puedan ser extraídos y analizados en el futuro.

2.4.4 Categorías de análisis en LabVIEW

LabVIEW ofrece múltiples funciones de análisis que abarcan diferentes áreas y métodos de extracción de información de datos. Estas funciones pueden ser modificadas para cumplir con las necesidades de cada desarrollador. Las categorías de análisis son las siguientes:

- Medición
- Procesamiento de señales
- Procesamiento de imágenes
- Algoritmos matemáticos
- Sistemas de control
- Sistemas de simulación

2.4.5 Herramientas de análisis en LabVIEW

El propio programa incorpora una serie de librerías y funciones que permiten realizar análisis en multitud de aplicaciones. Las funciones más avanzadas pueden medir características de las señales como las distorsiones totales de armónicas, respuestas de impulsos, respuesta de frecuencia... También se pueden realizar análisis numéricos que permitan resolver ecuaciones diferenciales, optimización de problemas...

Estas herramientas se suman a las que el propio usuario puede crear por sí mismo, aunque permiten ahorrar tiempo que permita centrarse en el problema y no en la creación de herramientas para solventarlo. Esto permite utilizar estas funciones sin conocer el funcionamiento del algoritmo.

3 OBJETIVOS

Ha quedado patente en los últimos tiempos la importancia de la monitorización estructural de cara a la gestión de las estructuras, por su ahorro en el coste de mantenimiento y por la necesidad de predecir posibles fallos que pongan en riesgo tanto vidas humanas como el funcionamiento de la red en la que se encuentre la estructura.

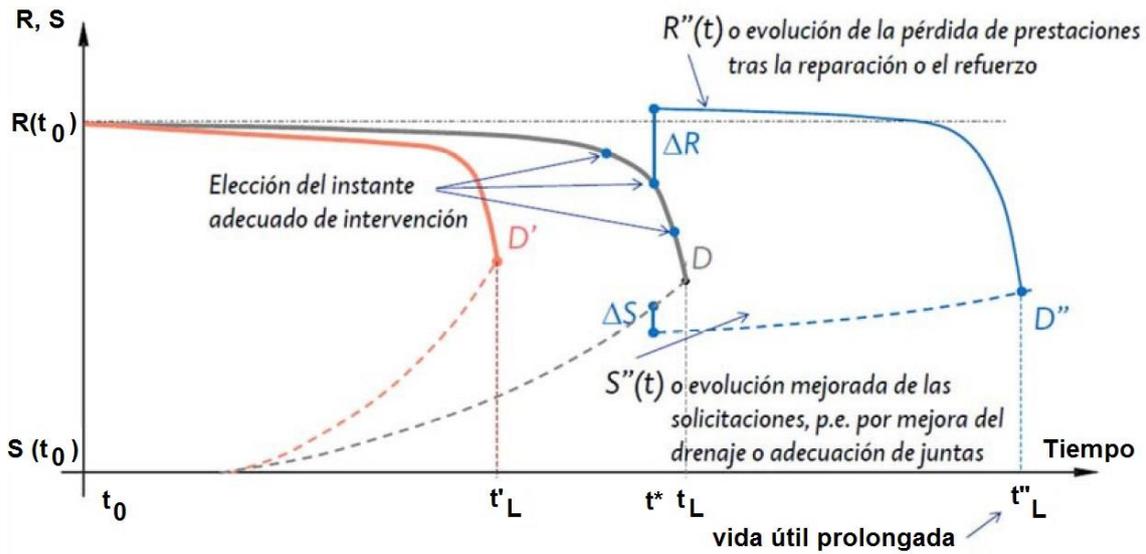


Figura 13. Mejora de prestaciones en función de la elección del momento de la intervención. (Victor Yepes Piqueras, 2018)

Es por ello que desde Tecnalía se han impulsado una serie de trabajos, mediante una colaboración con la Universidad de Cantabria llamada “AULA TECNALIA” que se complementan para el desarrollo de un sistema inteligente de monitorización que permita tomar decisiones con un alto nivel de garantía a los responsables en la gestión de la estructura en cuestión. Estos trabajos están divididos en las siguientes fases:

- Evaluación operacional
- Adquisición de datos
- Transmisión y almacenamiento
- Tratamiento de datos
- Modelización estadística
- Herramienta de diagnóstico

El objeto de este trabajo es desarrollar los cuatro primeros puntos. Mediante unos sensores en un puente a escala en el laboratorio de Tecnalía (extensómetros en este caso) se realizará la adquisición de datos mediante la extracción de la deformación del puente. La información obtenida se tratará mediante un programa elaborado para este cometido mediante LabVIEW. El objetivo es filtrar esta información para que ocupe el menor espacio posible y su tratamiento sea lo más rápido que se pueda.

Mediante unos valores límites establecidos previamente se establece una primera alarma, que provocará que se almacenen los datos de ese fallo y se envíe un aviso del posible evento para que sea analizado por los responsables de su gestión. El proceso de toma de decisiones llevado a cabo se resume en el siguiente diagrama de flujo.

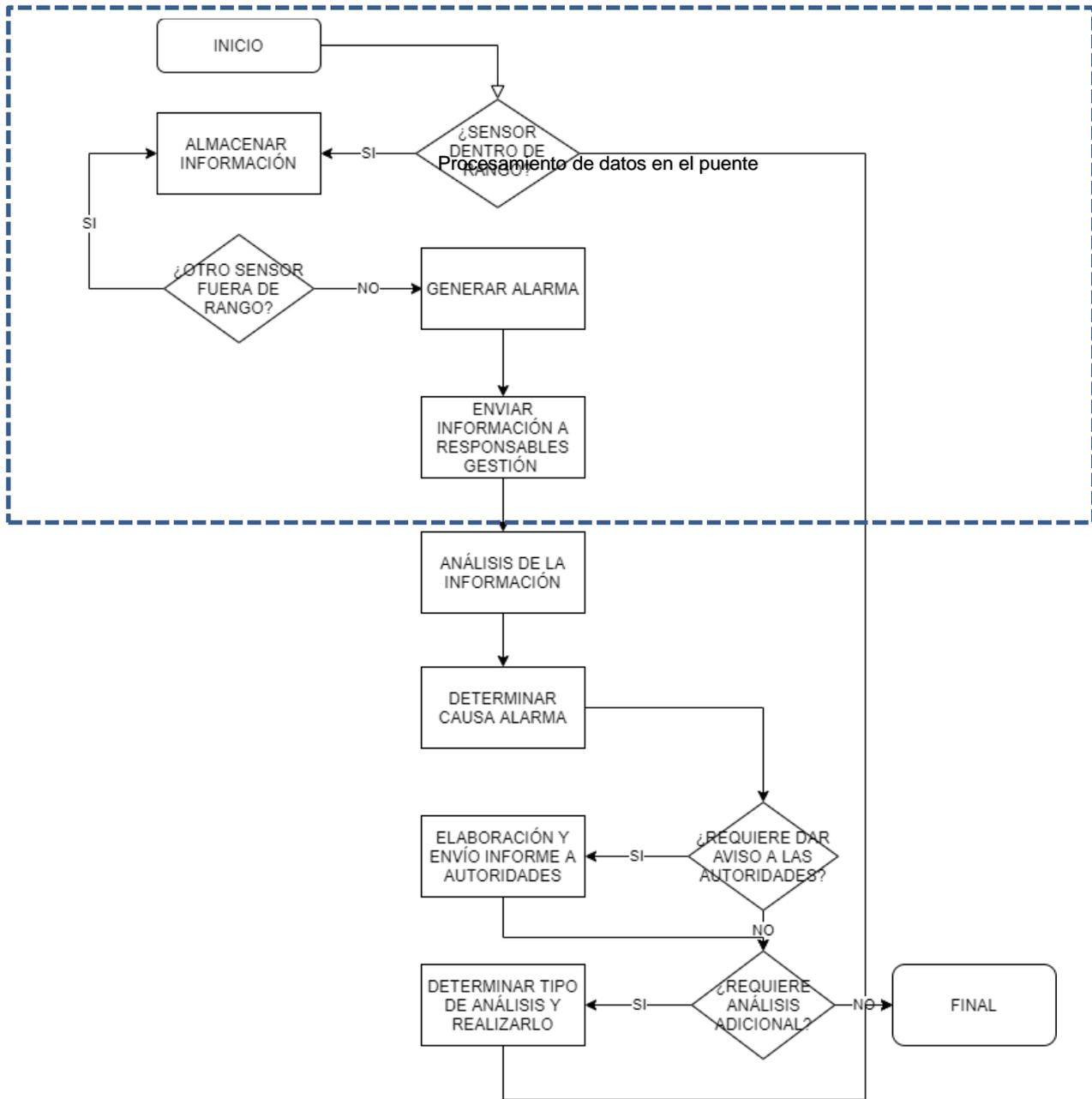


Figura 14. Diagrama de flujo sistema de monitorización

El resultado es un sistema que va desde la adquisición de los datos por los sensores, pasando por el tratamiento y almacenamiento de los mismos, hasta la generación de la alarma. Se ha implementado únicamente para extensómetros, pero mediante una serie de ajustes podría ser replicado para otro tipo de sensores: acelerómetros, inclinómetros, termómetros...

Con la primera alarma obtenida mediante el programa del presente trabajo, se activarían distintos sistemas de modelización estadística y modelización inversa desarrollados en otros trabajos TFM dentro del AULA TECNALIA.

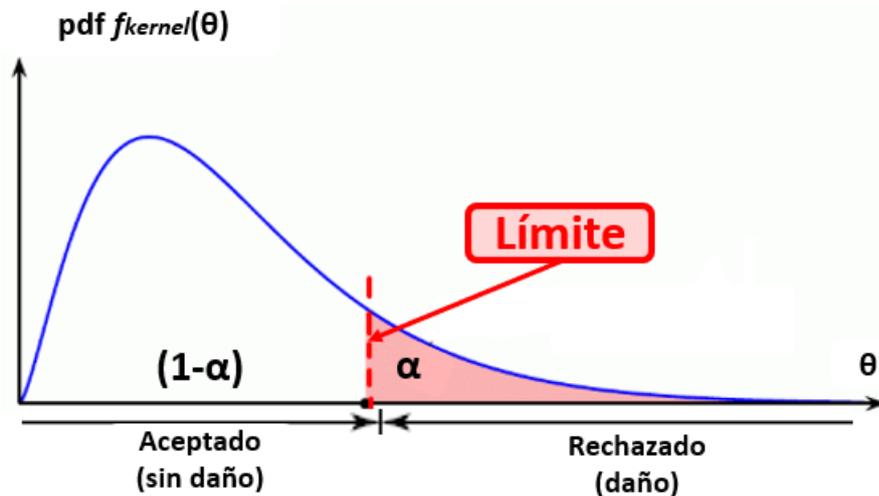


Figura 15. Modelización estadística para detección de daños.(Olmo, 2018)

Este trabajo permite saber si realmente hay un daño en el puente para así dar parte de ello y poder tomar decisiones al respecto para evitar el fallo total de la estructura y los daños que ello puede conllevar.

En el futuro estos trabajos se complementarán con el desarrollo de una herramienta que permita obtener la grabación del momento en el que ocurre el evento extraordinario para poder observar si existe alguna causa directa y visible que haya causado el evento.

4 DESARROLLO DEL SISTEMA INTELIGENTE DE MONITORIZACIÓN

4.1 CARACTERIZACIÓN DEL MODELO

4.1.1 Descripción del puente

El puente a escala en el que se realizan las pruebas en las instalaciones de Tecnalia mide 6 metros de longitud y es isostático. Entre los elementos que contiene hay: vigas principales, viguetas, montantes, diagonales, cartelas, apoyos rígidos y móviles y tornillos para la ejecución de las uniones. En las siguientes figuras se muestran los detalles del puente.



Figura 16. Imagen puente a escala I.



Figura 17. Imagen transversal del puente a escala II.

4.1.2 Material del puente

El material del puente a escala es policarbonato Makrolon GP, producido por Bayer. Se trata de un material plástico transparente con dos grandes beneficios:

- Resistencia a impactos extremos
- Resistencia a altas temperaturas

Este material se ha utilizado para los elementos más destacables del puente: vigas principales, viguetas, montantes, diagonales y cartelas. Para realizar las uniones en las cartelas se han utilizado tornillos de forma que éstas sean articuladas.

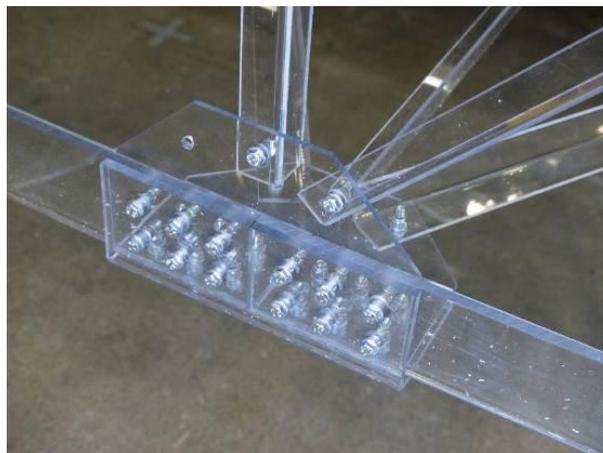


Figura 18. Detalle de unión articulada con cartela.

Al tratarse de un puente isostático, los apoyos en un extremo del puente son de tipo rígido mientras en el otro extremo son móviles, como se puede apreciar en las siguientes imágenes.



Figura 19. Detalle de apoyo rígido



Figura 20. Detalle del apoyo móvil

4.1.3 Elementos del puente

La construcción del puente a escala de Tecnalia se realizó el año 2018 una vez recibidas las distintas piezas de policarbonato que lo conforman. Se unieron las distintas piezas mediante tornillos, creando así las uniones articuladas en los distintos nodos.

Una vez estaba ensamblado toda la estructura se hizo la unión con los apoyos, poniendo vaselina en los apoyos rígidos para que este pudiera deslizar y en los apoyos móviles únicamente se dejaron apoyados los cilindros de acero. En la siguiente tabla se detallan las dimensiones de los diferentes elementos.



Elementos	Altura(mm)	Anchura(mm)	Espesor(mm)
VIGAS PRINCIPALES	70	70	6
MONTANTES	50	50	5
MONTANTES	23	23	3
DIAGONALES	23	23	3
DIAGONALES	27,5	27,5	3
VIGUETAS	23	23	3
VIGUETAS	43	3	5
DIAGONALES	25	-	3
CARTELAS	175	114,5	3

Tabla 5. Dimensiones de los elementos del puente a escala

4.2 PROGRAMACIÓN DEL SISTEMA INTELIGENTE DE MONITORIZACIÓN

En este apartado se contempla el desarrollo de la programación del sistema de monitorización, para lo que se usará la plataforma de programación LabVIEW del desarrollador *National Instruments*. El objetivo es crear un programa que recoja un archivo con los datos de los diferentes extensómetros con el objetivo de tratar la información y compararla con unos límites preestablecidos de forma que se cree una alarma en el caso de que salga de esos límites.

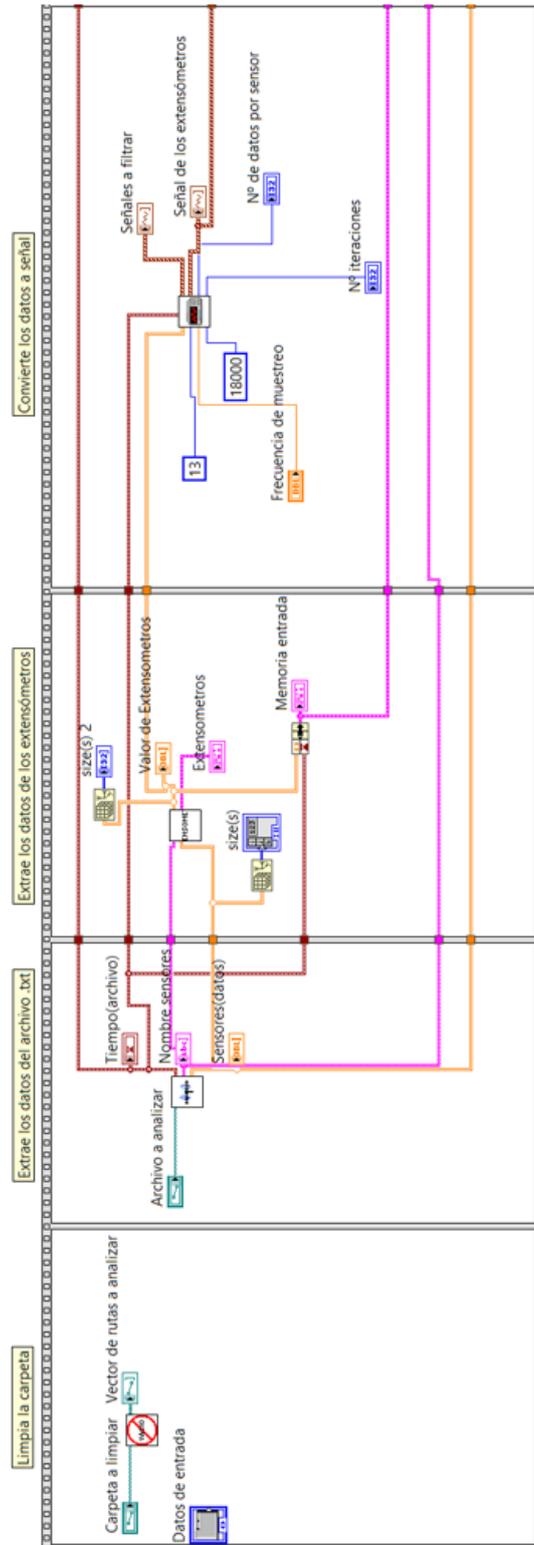


Figura 21. Programa completo (parte 1)

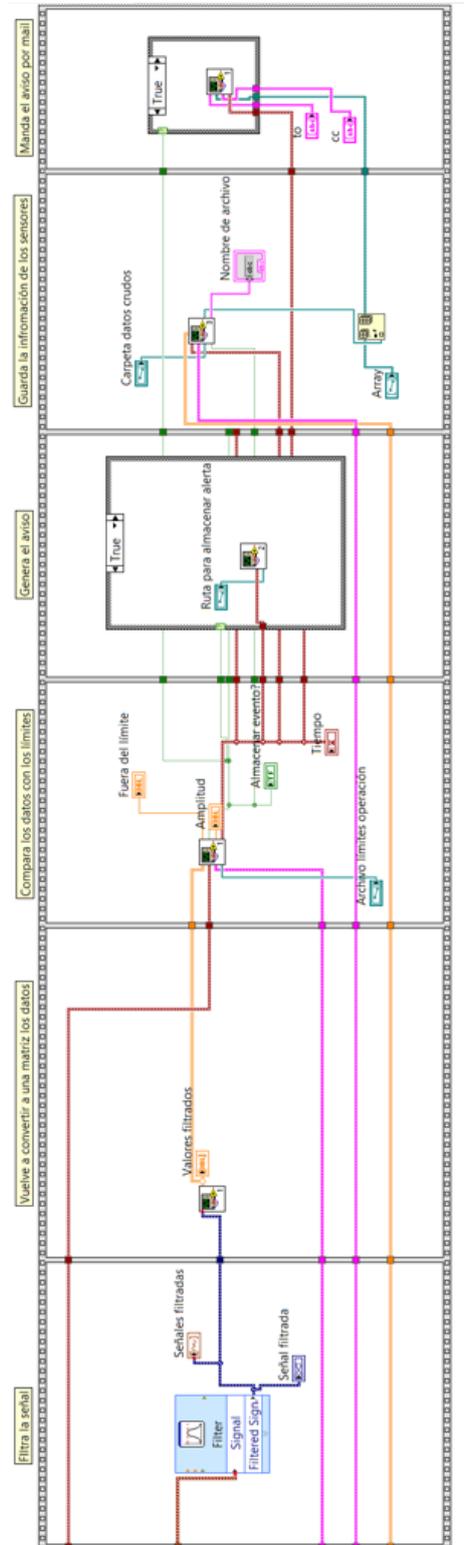


Figura 22. Programa completo (parte 2)



A continuación, se describen en detalle los módulos y submódulos que forman el programa completo.

4.2.1 Interpretación del archivo de datos

En primer lugar, con el módulo de adquisición de datos que posee Tecnia se obtienen los archivos con los datos de los sensores. Estos archivos se guardan en una carpeta y deben llevar el nombre con el siguiente esquema: *Sensors.AAAAMMDDhhmmss.txt*

Esta nomenclatura nos dará la información necesaria sobre la fecha de la toma de datos, como puede verse en la siguiente tabla.

	Tipo	Fecha			Tiempo			Extensión
Nomenclatura	Sensors.	Año	Mes	Día	Hora	Minuto	Segundo	.txt
Ejemplo	Sensors.	2020	4	20	12	13	18	.txt

Tabla 6. Nomenclatura de los archivos generados en la adquisición de datos.

La información contenida por el archivo está codificada como archivo de texto delimitado por tabulador, donde la primera fila (encabezado), incluye el tiempo y nombre de cada sensor, mientras el resto de las filas contienen los valores obtenidos por los sensores durante dos minutos de adquisición de datos continua. El archivo contiene tantas columnas como sensores haya y 18000 filas de datos (incluyendo una fila más con el nombre de los sensores), lo que se corresponde a 120 segundos de información a una frecuencia de muestreo de 150Hz. Estos valores se almacenan con 3 decimales siendo el tamaño de estos archivos de aproximadamente 6,7MB.

En la siguiente tabla se detalla cómo se estructuran el encabezado de un archivo generado en el puente. La primera columna corresponde al tiempo de adquisición medido en segundos. Para este trabajo únicamente se van a utilizar extensómetros por lo que se utilizarán 13 columnas de datos (correspondientes a 13 extensómetros).

Columna	0	1-13
Nombre	Tiempo	STRAIN
Instrumento	Reloj de interrogador	Extensómetro
Magnitud	Tiempo	Deformación
Unidad	Segundos	μm/m

Tabla 7. Encabezado de los archivos generados por el sistema de adquisición de datos.

A estos datos se podrían añadir los datos de termómetros, acelerómetros, inclinómetros o sensores de desplazamiento entre otros. Una vez interpretada la ruta de almacenamiento de datos, la estructura del nombre de los archivos y el contenido se continúa desarrollando el primero módulo del programa cuyo objetivo es el de procesar los archivos generados durante la monitorización del puente en el laboratorio, de forma

que se emule el sistema de adquisición de datos para el posterior desarrollo de los módulos que permitan analizar los datos obtenidos.

4.2.2 Lectura de datos

El objetivo del primer módulo es leer los archivos que contiene la carpeta correspondiente al mes que se quiere estudiar. El sistema de adquisición de datos puede crear archivos sin apenas información, únicamente con el encabezado, sin llegar a obtener los 2 minutos de información continua.

El sub-módulo desarrollado en la siguiente figura compara el tamaño de los archivos que lee, de forma que, si el tamaño de éste es menor de 6,5MB, lo elimina; de forma que no se incluya en un posterior análisis, haciendo el proceso más ligero y más óptimo.

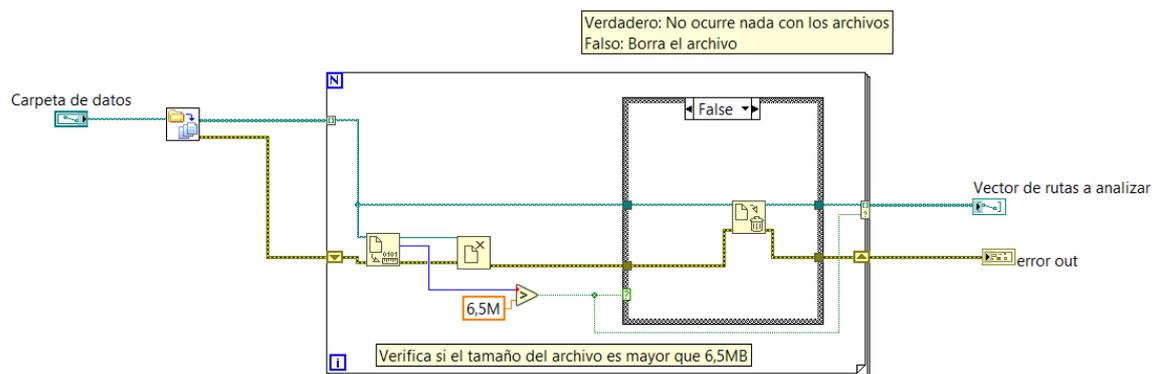


Figura 23. Módulo de borrado de archivos pequeños.

El siguiente submódulo existente dentro de esta primera parte de adquisición de datos se encarga de extraer:

- Tiempo inicial del archivo
- Nombre de los sensores
- Valores de los sensores

En el caso del nombre de los sensores se obtiene un vector que los incluye a todos y los valores de los sensores en una matriz de 18000 filas por 62 columnas (el archivo vendría con datos de más sensores, aunque posteriormente únicamente se utilicen los datos de los extensómetros). En la siguiente figura se observa el submódulo desarrollado.

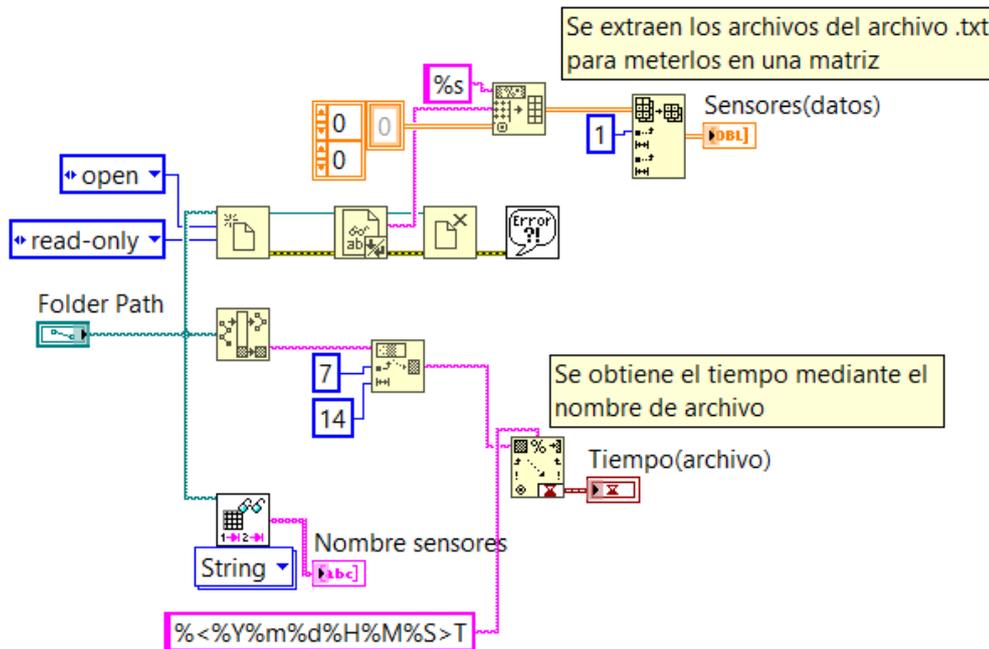


Figura 24. Módulo de lectura de archivos.

Cada una de las 18000 filas se corresponde a un vector de datos, que está formado por el tiempo de la toma de datos y los datos correspondientes a los sensores en ese preciso instante.

La información de los sensores en el sub-módulo se consigue de la siguiente forma:

- La información referente al tiempo inicial se obtiene descodificando el nombre del archivo, siguiendo el esquema mostrado en la tabla 6.
- Los nombres de los sensores se obtienen extrayendo la primera fila del archivo de datos, sin incluir la primera columna, que corresponderá al tiempo.
- Las magnitudes de los sensores se obtienen extrayendo todo el archivo salvo la primera columna y fila, correspondientes al tiempo y al nombre de los sensores.

El último sub-módulo correspondiente a esta parte del programa se encarga de extraer la información correspondiente únicamente a los extensómetros, los nombres de estos y la información obtenida por los sensores. Para ello, como se muestra en la figura siguiente; para obtener los nombres de los extensómetros se extraen los 13 primeros datos del vector de nombres obtenido en el sub-módulo anterior. En el caso de los valores de los sensores, se seguirá un proceso similar, extrayendo las 13 primeras columnas de la matriz de magnitud de los sensores que se ha extraído previamente.

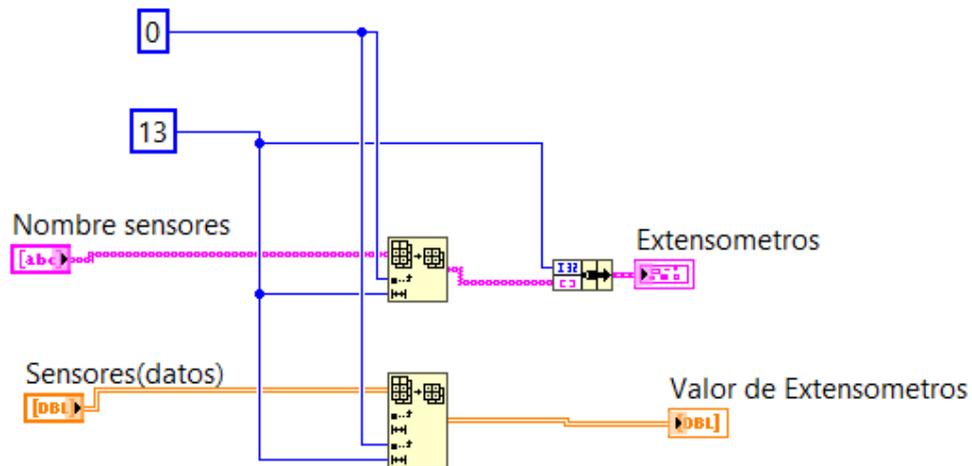


Figura 25. Módulo de extracción de datos.

Con este último sub-módulo, integrándolo con los desarrollados anteriormente; se emulan los valores obtenidos en el puente a escala. Por cada archivo de 2 minutos se generan 18.000 iteraciones. En la primera se obtienen los valores de los 13 extensómetros durante el primer instante de muestreo del archivo (el tiempo inicial que se obtiene de descodificar el nombre del archivo), al cual se le incrementa el tiempo al añadir 8ms al valor inicial de forma que se emule el periodo de adquisición de datos de 150Hz. Este proceso se repite hasta llegar a la última fila de archivos, correspondiente al tiempo inicial más 2 minutos. Este proceso se realiza para todos los archivos existentes en la carpeta.

4.2.3 Pre-procesamiento de los datos: filtrado

La señal de los extensómetros contiene datos indeseados en forma de ruido, provocados por el propio sistema de adquisición de datos óptico (interrogador) o por la tecnología de los transductores (rejillas de Bragg), lo que ocasiona que las señales obtenidas con las cuales se van a comparar los límites normales de operación no sean del todo confiables, principalmente en casos en los que los límites de operación normal están dentro del umbral de ruido (Martinez Trujano et al., 2016). Por esta razón es necesario aplicar algún algoritmo que permita quitar ese ruido indeseado de la señal. Para la elección de ese algoritmo que haga de filtro a la señal se han seguido los siguientes criterios:

- Permitir la adquisición de datos en tiempo real.
- Minimizar el tiempo de procesamiento de datos.
- Menor error en amplitud entre la señal filtrada y la monitorizada.
- Menor tiempo de retardo entre la señal filtrada y la monitorizada.

LabVIEW, proporciona un VI Express llamado “Filter”, que analiza punto por punto la señal de los 13 extensómetros de manera simultánea, con el ahorro de tiempo que ello conlleva. Este filtro posee múltiples configuraciones de forma que se puedan modificar los parámetros del filtro. En la siguiente tabla se indican las distintas configuraciones, así como las que se van a utilizar.

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 (<i>n</i>)	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.

Figura 26. Parámetros de configuración del VI Filter

Para poder aplicar el filtro con los parámetros antes mencionados, es necesario pasar los datos a una señal tipo *waveform*, con *n* cantidad de datos por cada extensómetro, para poder realizar el análisis de los 13 extensómetros simultáneamente.

Para poder aplicarlo, se ha creado un submódulo que crea un arreglo móvil para cada extensómetro, con una cantidad de datos inicial $n=1$, incrementándose en un elemento hasta $n=5000$, manteniéndose ese tamaño de datos en todo momento. A este vector de elementos se le añade el periodo de adquisición de datos en segundos. Este

proceso se repite con los 13 extensómetros para crear finalmente un arreglo con las 13 señales que posteriormente serán filtradas. En la siguiente figura se observa el proceso mediante el cual se realiza.

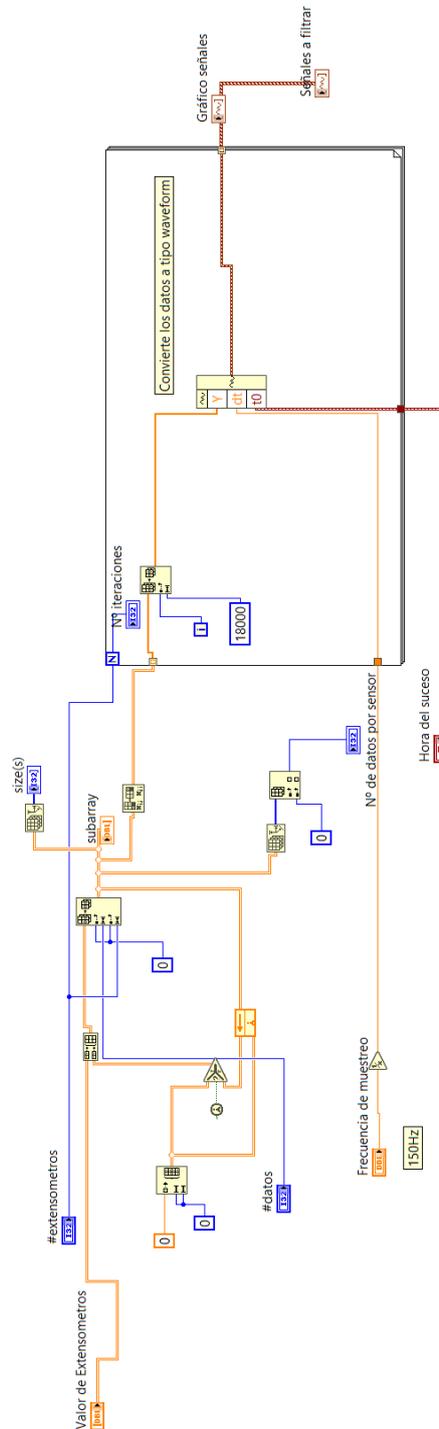


Figura 27. Módulo de arreglo de datos para conversión a señal.

Tras haber transformado la matriz con los valores de los extensómetros a una señal compuesta por las 13 que corresponden a cada extensómetro; se aplica el filtro.

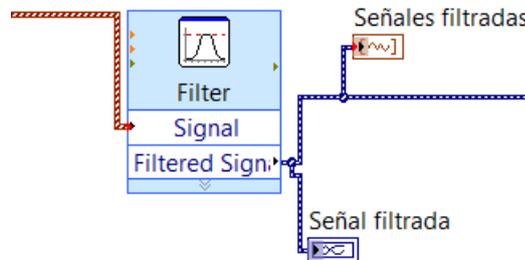


Figura 28. Sub-módulo "Filter"

Una vez obtenemos la señal filtrada, para el posterior análisis de nuestros datos; debemos convertirlos de nuevo a una matriz. Esta conversión se realiza mediante el sub-módulo de la siguiente figura.

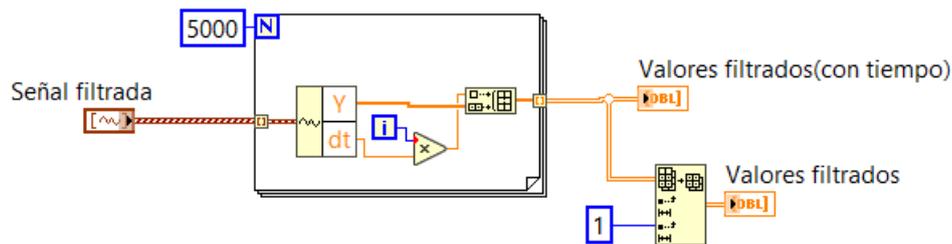


Figura 29. Sub-módulo conversión señal a matriz

4.2.4 Comparación de la señal filtrada con los límites de operación

Una vez tenemos la matriz de datos filtrados procedemos a comparar esos datos con los límites normales de cada sensor de forma que si son superados podamos obtener el aviso de que ha ocurrido un evento extraordinario. El siguiente módulo genera un aviso en caso de superar estos valores. Mediante un ciclo se van analizando uno por uno los datos de los extensómetros comparándolos con los límites de cada uno mediante el siguiente submódulo.

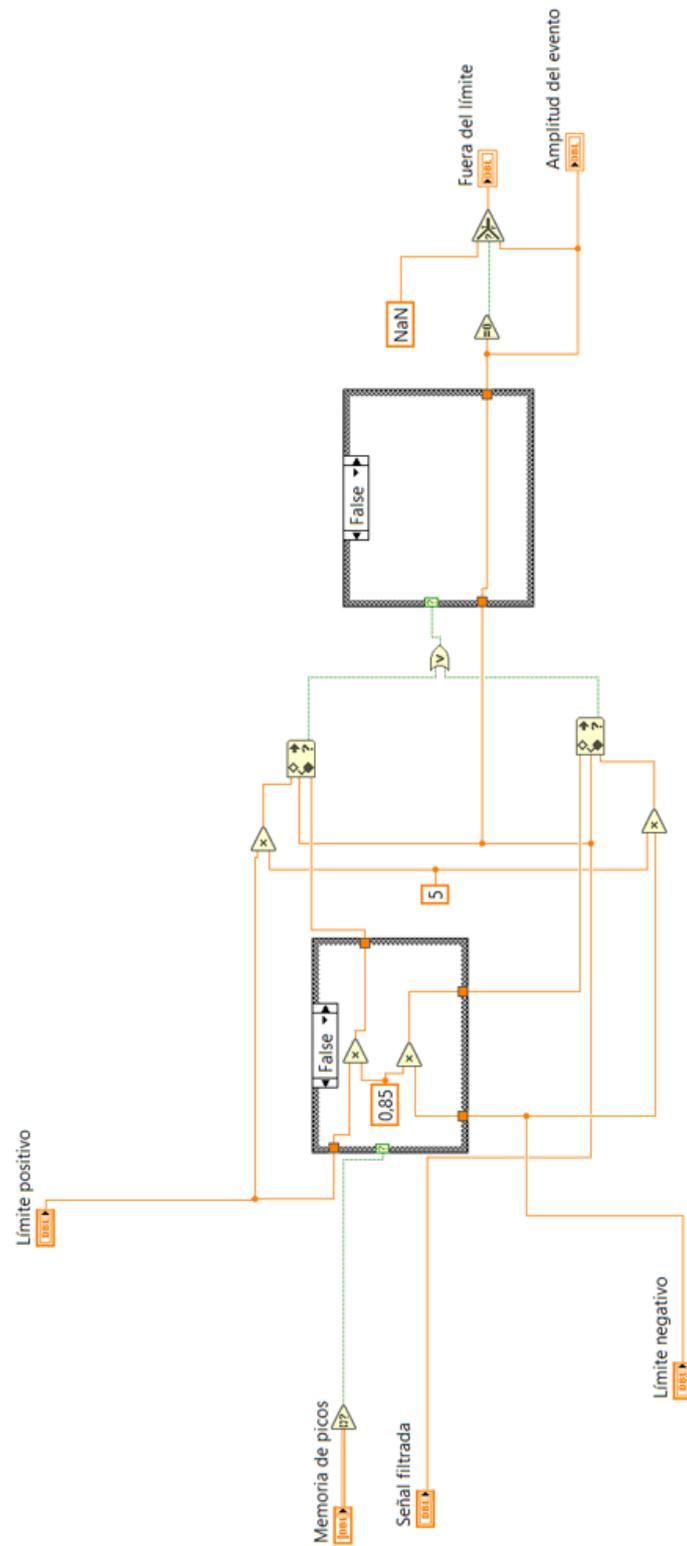


Figura 30. Submódulo memoria de picos

El submódulo anterior se incluye dentro del módulo principal que será el que obtiene los límites de los extensómetros y los introduce para compararlos, de forma que en el caso de que alguno sobrepase el valor, se guarde la amplitud del evento y su fecha de ocurrencia. Por otro lado, en el momento que ocurre el evento se activará un booleano que será el que ponga en funcionamiento el resto de módulos que vendrán más tarde.

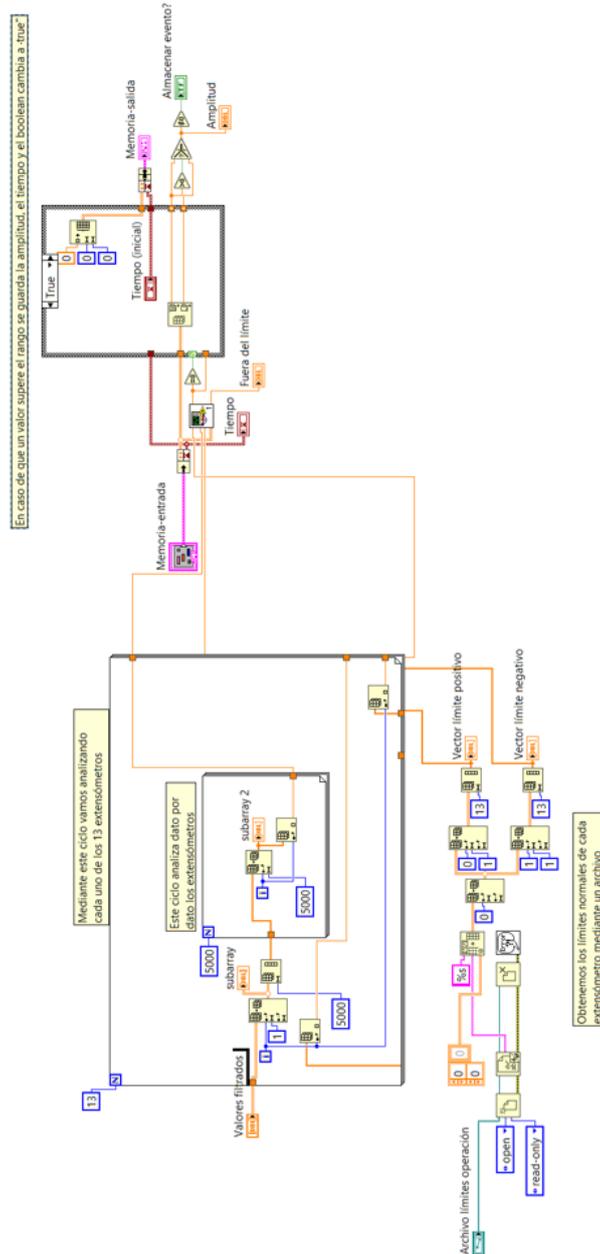


Figura 31. Módulo de comparación y obtención de alerta

4.2.5 Almacenamiento de la información de la alarma

Una vez que se ha indicado que ha existido un evento extraordinario y obtenidos el tiempo y la amplitud, se procede a almacenar la información. En el caso de un puente real se almacenaría en el disco duro del PC instalado en el puente. En primer lugar, hay que definir la ruta en la que se guardarán los archivos. En mi caso será la siguiente:

C:\Users\Usuario\OneDrive - Universidad de Cantabria\TFM_TECNALIA\Eventosextraordinarios\Año\Mes\Día\ALARMA.AAAAMMD D.txt

Estas carpetas de Año, Mes y Día en las que se almacena la información se crean automáticamente en función del tiempo en el que haya ocurrido el evento extraordinario.

En la ruta comentada más arriba se guarda un archivo común vector que incluye los datos de la siguiente tabla, de forma estructurada por cada alarma ocurrida en el mismo día.

Archivo	20200524113520.Evento.txt
Fecha	24/05/2020
Hora	11:35:20
Nivel	Primero
Tipo de sensor	Deformación
Sensor	STRAIN1
Amplitud	123,864

Tabla 8. Registro de alarma

El siguiente sub-módulo se encarga de almacenar un registro de los eventos extraordinarios ocurridos cada día de monitorización.

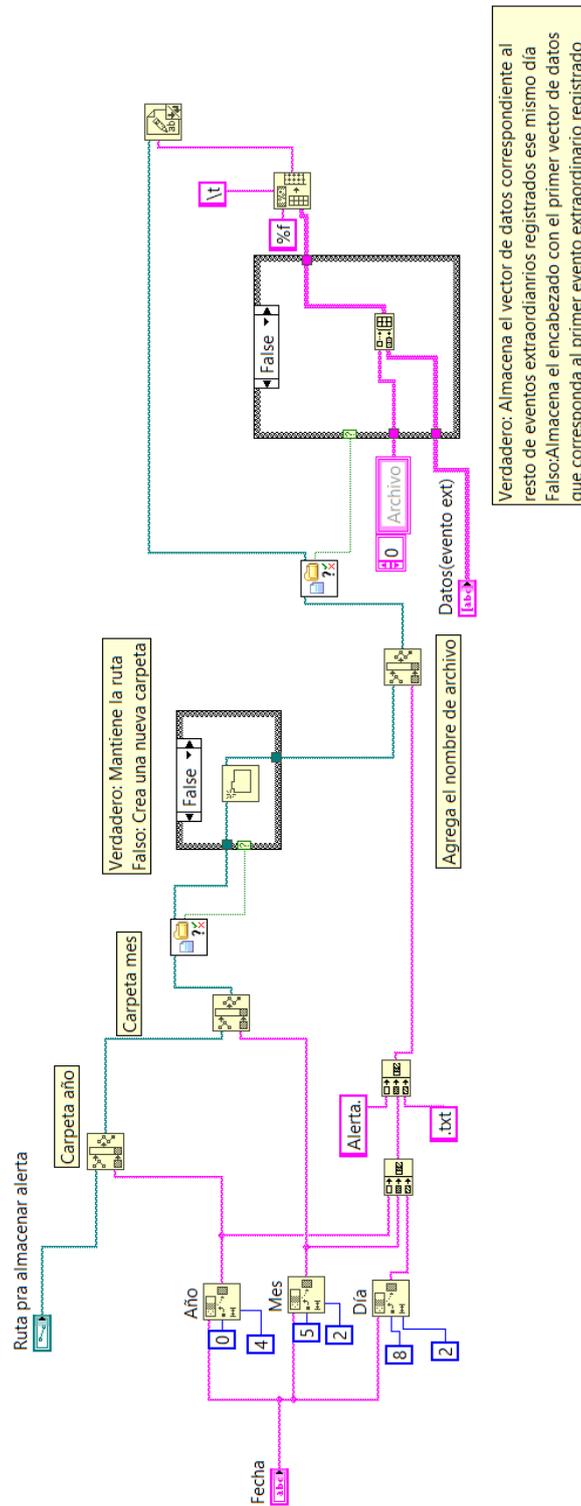


Figura 32. Submódulo de registro de la información de la alarma

4.2.6 Almacenamiento de datos del evento extraordinario

Es importante conocer la condición de la estructura previa al evento extraordinario, así como la posterior; por lo que es necesario almacenar dos bloques de datos con los datos previos y posteriores.

En la siguiente figura se muestra el código del módulo que almacena los datos previos y posteriores a la alarma.

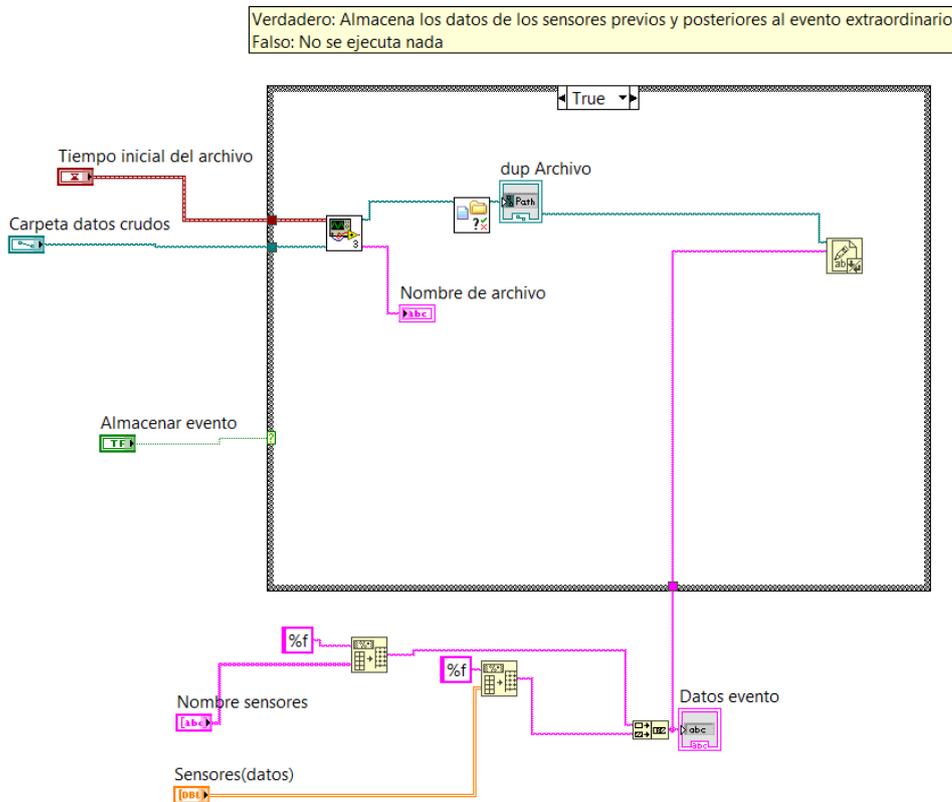


Figura 33. Módulo de almacenamiento de datos del evento extraordinario

Dentro del módulo anterior se encuentra un sub-módulo que se encarga de crear la ruta en la que se almacenarán los datos de los sensores, tanto previos como posteriores al evento extraordinario. Esta ruta se crea a partir del tiempo registrado.

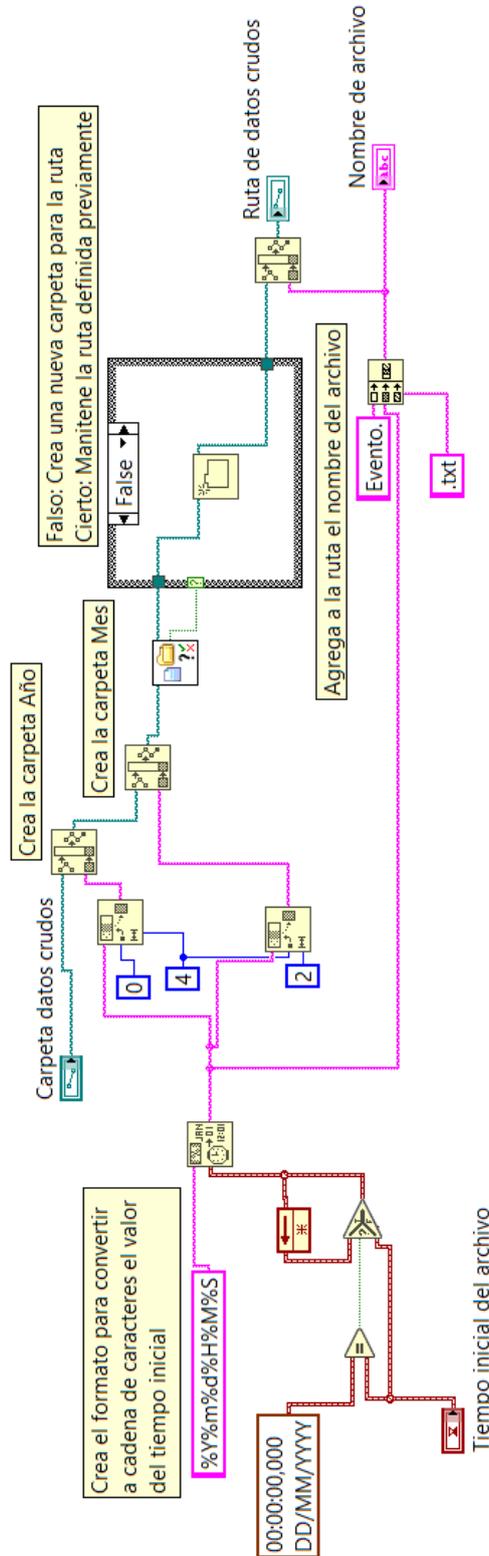


Figura 34. Sub-módulo de creación de ruta para datos del evento.

En el caso de conectar el programa a un sistema de adquisición de datos en línea que nos diera los datos en tiempo real inicialmente existiría una matriz que inicialmente estaría vacía y que almacenará un vector de datos hasta contener 9.000 filas correspondientes a los 60 segundos de datos previos a una frecuencia de 150Hz, para los 13 extensómetros del puente. Una vez llena la matriz con 9.000 vectores, cuando entra un nuevo vector desplaza al resto, de forma que el primer vector incluido en la matriz quede eliminado. A medida que llegan valores se van borrando los primeros vectores creando un buffer de información móvil, que será vaciado hasta que se registre una alarma. Ese buffer de información será el que contenga los datos correspondientes al minuto previo a que ocurra el evento extraordinario.

Al detectarse un evento extraordinario, el buffer de datos se encontraría lleno con minuto previo de información, vaciando el buffer móvil y obteniendo la fecha y hora inicial del evento. Se guarda el encabezado con el nombre de los sensores junto con los valores del buffer móvil. Estos últimos datos se convierten a cadena de caracteres para sacar el archivo en formato .txt.

4.2.7 Envío de aviso a los responsables vía mail

En último lugar, una vez generada la alarma y almacenado el archivo con los datos de los sensores; mediante el siguiente módulo se genera un mail de aviso al responsable correspondiente. Mediante las herramientas de generación mail mediante servidor SMTP se define la cuenta desde la que se va a realizar el envío en mail (en este caso una cuenta personal de Gmail), así como los destinatarios y el mensaje, que será siempre el siguiente:

“Ha ocurrido un evento extraordinario en la siguiente fecha: #Fecha del evento”

“Se adjuntan los datos de los sensores en el minuto anterior y posterior al evento.”

Por último, se adjunta el archivo de datos con el evento creado en el VI anterior y se envía el mail.

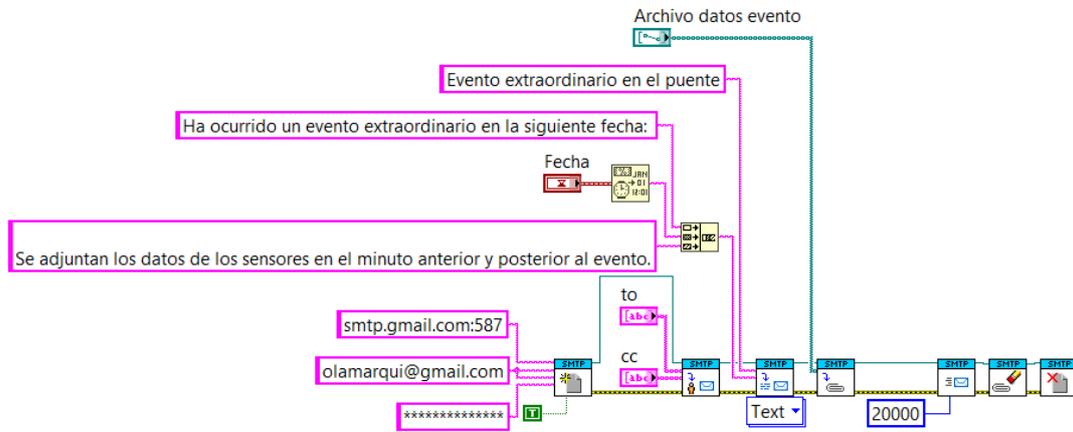


Figura 35. Generación de aviso por mail

5 VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE ALARMA

Para llevar a cabo la validación del sistema se ha hecho una prueba gracias al puente de laboratorio que dispone Tecnalia en sus instalaciones del Parque Tecnológico de Bizkaia (Zamudio). Se dispuso el puente con 13 extensómetros colocados en el mismo y se tomaron datos durante algo más de 2 minutos en los que se aplicaron varias excitaciones.

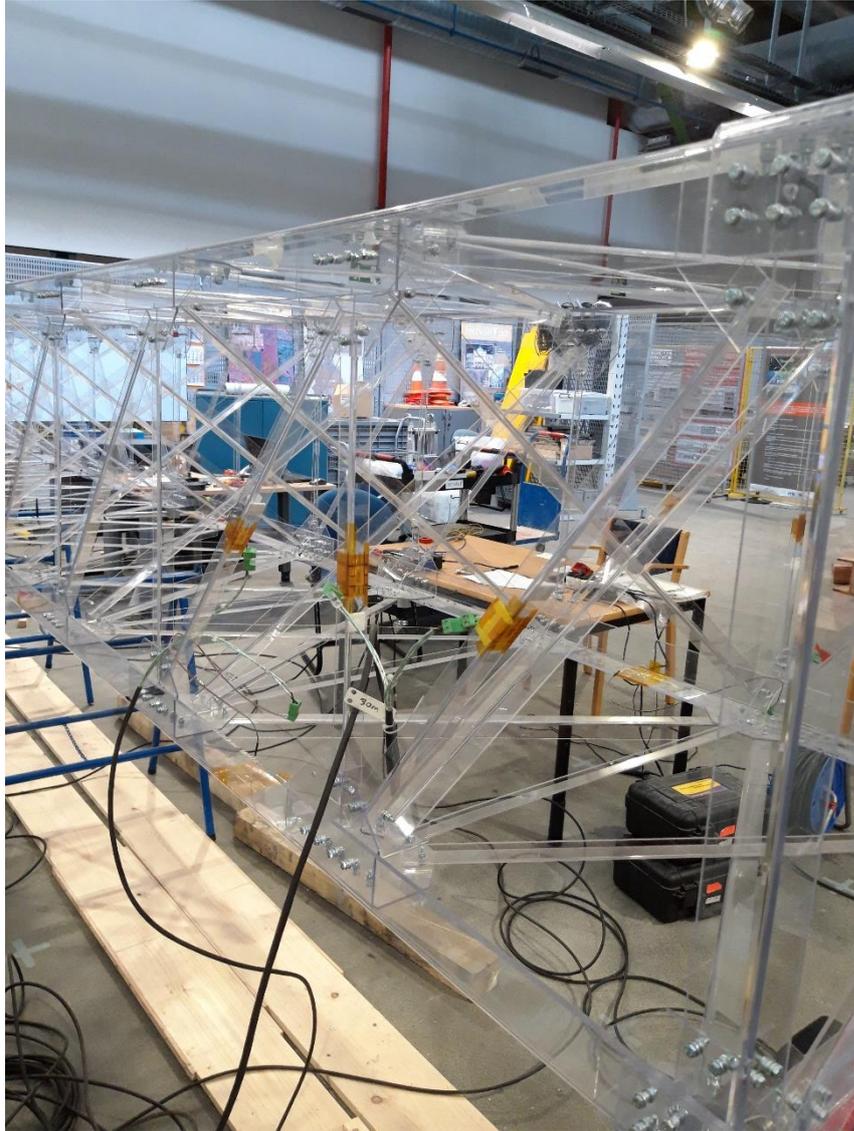


Figura 36. Extensómetros colocados en el puente de laboratorio.

Cómo resultado se obtuvo un archivo en formato .txt con los datos de los 13 extensómetros medidos a una frecuencia de 150Hz.

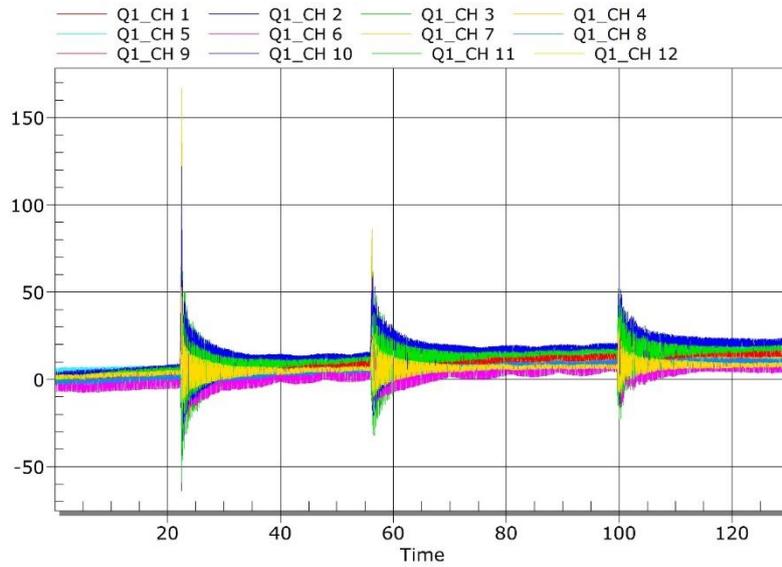


Figura 37. Gráfica de la deformación en los extensómetros

Asimismo, se dispone de un archivo .txt con los valores límite de cada uno de los extensómetros. Una vez seleccionados estos archivos en el panel frontal, se introduce la frecuencia de adquisición de datos (150Hz en este caso), la carpeta en la que se van a generar los avisos y por último, los destinatarios del mail de aviso en el puente.

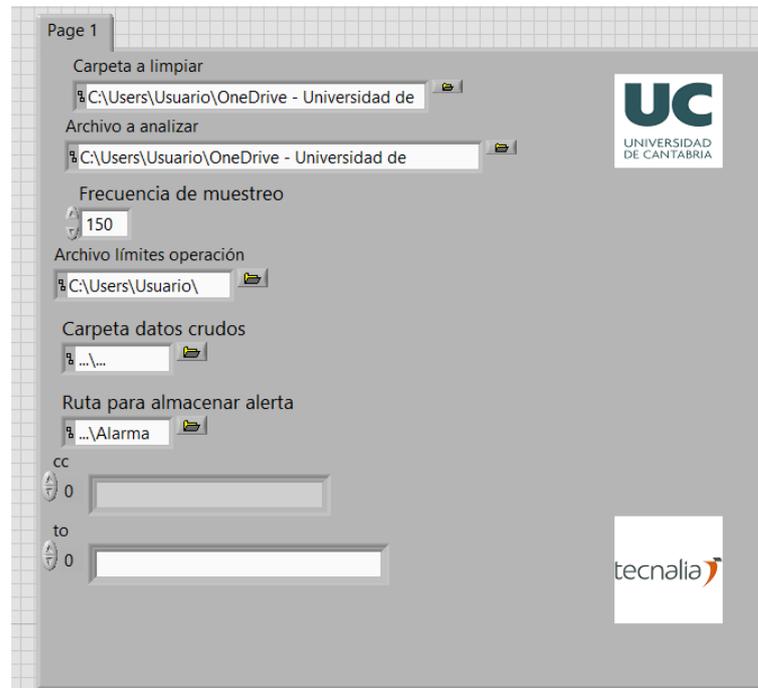


Figura 38. Panel de datos de entrada.

Una vez introducidos los datos necesarios se ejecuta el programa que irá ejecutando, siguiendo la siguiente secuencia.

1. Limpieza de la carpeta

En primer lugar, el programa elimina los archivos de la carpeta que tengan un tamaño inferior a 6,5 MB de forma que no se acumule información incompleta que no va a ser aprovechada.

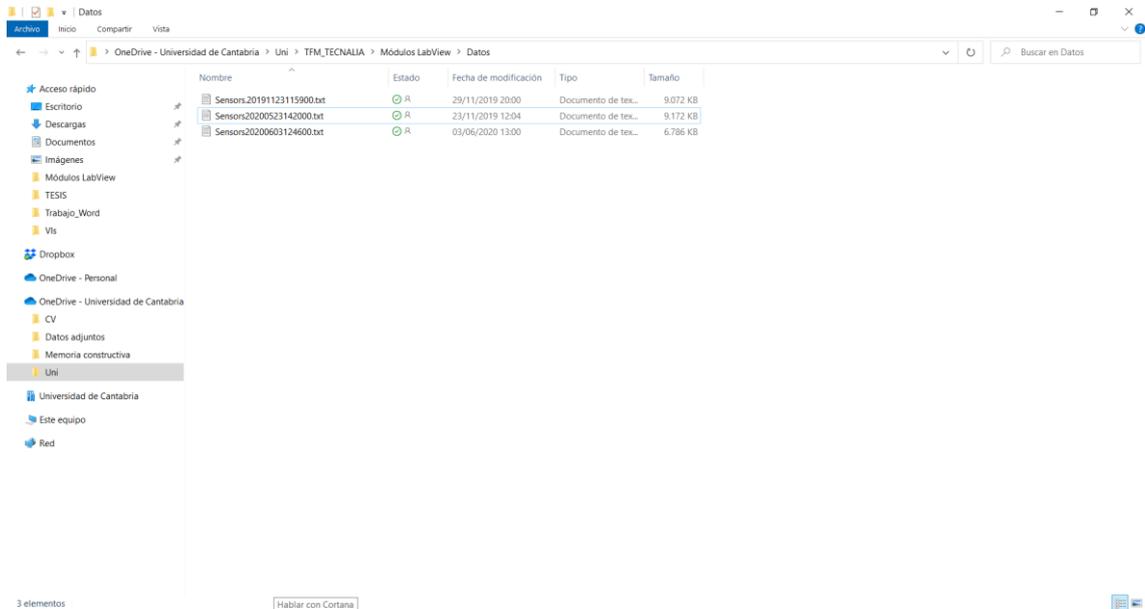


Figura 39. Carpeta de datos.

2. Interpretación de los datos

Una vez limpia la carpeta de datos el programa interpreta el archivo de forma que extrae la siguiente información:

- Fecha: se obtiene del nombre del archivo
- Nombres de los sensores: se obtienen al extraer la primera fila del archivo
- Datos: se obtienen de extraer el resto de las filas del archivo.

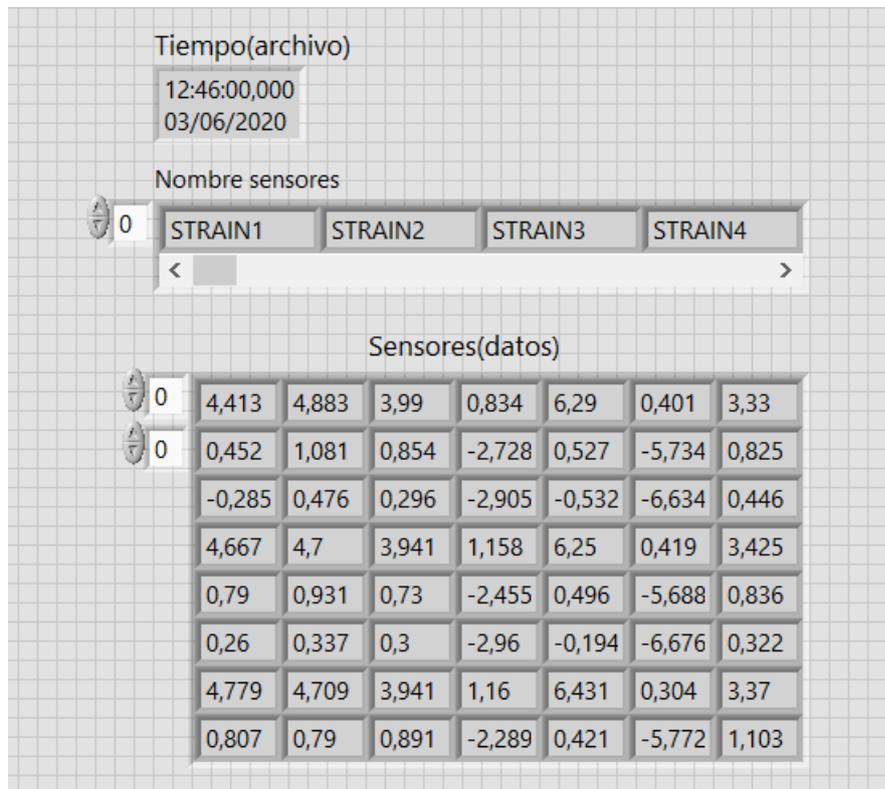


Figura 40. Fecha, nombres y datos de los extensómetros

3. Extracción de los datos de los extensómetros

En este caso los datos que vamos a analizar son los de los 13 extensómetros del puente de laboratorio, por lo que se extraen estos datos de la matriz que contiene los datos de todos los sensores del puente (de haberlos).

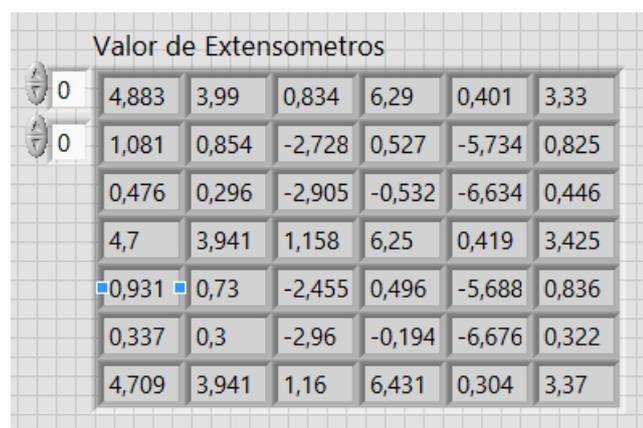


Figura 41. Extracción de los valores de los extensómetros

4. Conversión de los datos del extensómetro en señal

Una vez extraídos los datos de los extensómetros interesa convertirlos en una señal de forma que se pueda filtrar mediante una de las herramientas “VI Express” que posee el programa.

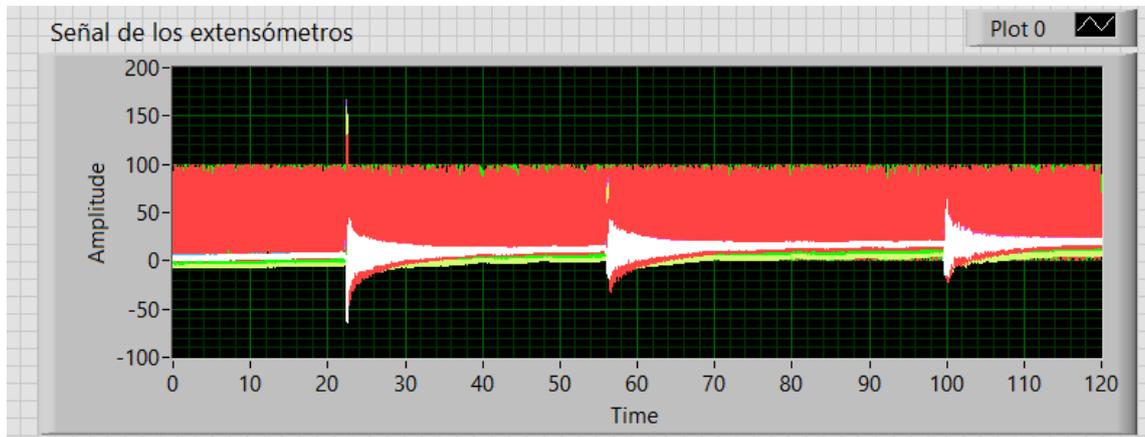


Figura 42. Señal de los extensómetros antes de filtrar

5. Aplicación del filtro “Filter.vi”

Tras obtener la señal se le aplica el filtro con los siguientes parámetros de forma que podamos obtener la señal con la que vamos a comparar con los valores límites establecidos.

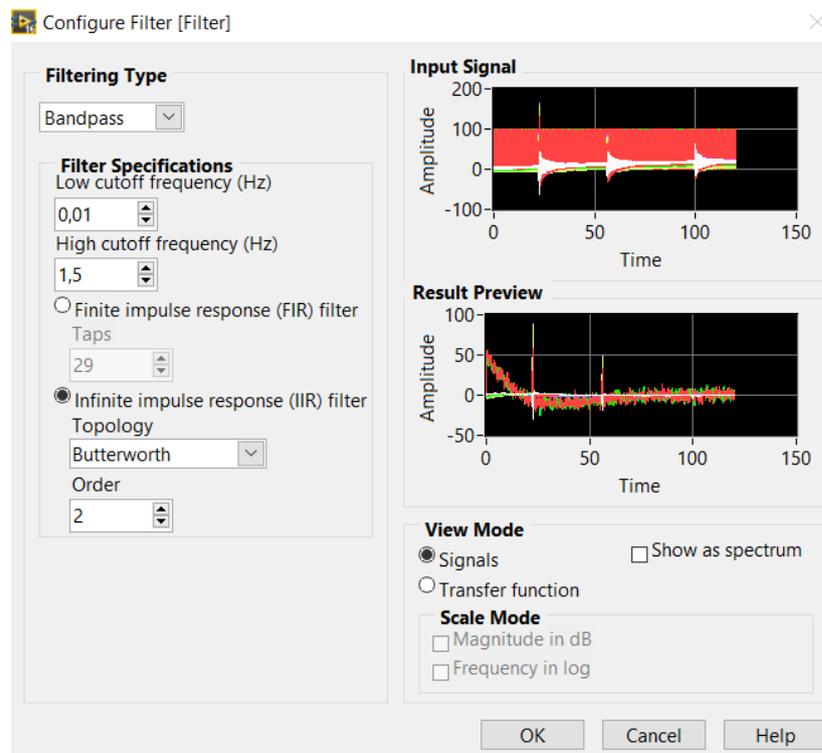


Figura 43. Parámetros de configuración del filtro.

La siguiente sería la señal filtrada:

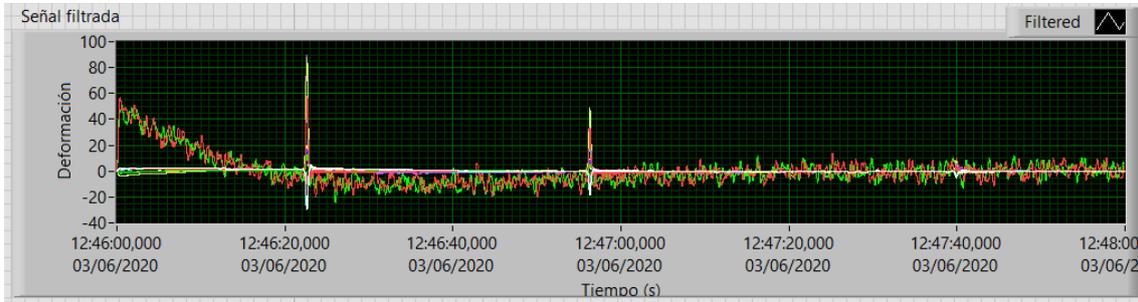


Figura 44. Señal filtrada

6. Conversión en matriz de la señal filtrada

Una vez filtrados los datos, se vuelven a convertir a una matriz para poder compararlos con los valores límite.

Valores filtrados

0	0,0045	0,0188	0,0388	0,0632	0,0954	0,1310	0,1689
0	0,0007	0,0033	0,0107	0,0258	0,0447	0,0668	0,0953
	-0,002	-0,009	-0,018	-0,033	-0,052	-0,073	-0,098
	0,0058	0,0232	0,0457	0,0721	0,1083	0,1473	0,1876
	-0,005	-0,026	-0,064	-0,109	-0,166	-0,235	-0,309
	0,0003	0,0043	0,0155	0,0315	0,0509	0,0755	0,1024
	0,0005	0,0002	-0,005	-0,017	-0,030	-0,046	-0,067
	0,0004	0,0015	0,0056	0,0156	0,0286	0,0440	0,0644
	0,0004	0,0052	0,0179	0,0358	0,0581	0,0878	0,1219
	0,0016	0,0072	0,0155	0,0247	0,0367	0,0506	0,0649
	0,0015	0,0064	0,0154	0,0308	0,0514	0,0750	0,1029
	0,0051	0,0857	0,3326	0,7393	1,2522	1,8828	2,6987

Figura 45. Matriz de los valores de extensómetros filtrados

7. Comparación con los límites

En esta secuencia del programa se comparan los datos filtrados con los límites con un ciclo, de forma que si alguno de los valores está fuera de rango ponga en marcha el resto del programa a continuación.

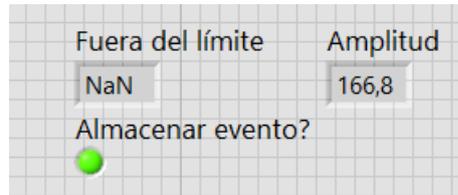


Figura 46. Aviso de almacenamiento de evento

8. Generación de la alerta

Una vez tenemos información de que ha ocurrido un evento se crea una carpeta con el año y el mes para almacenar un archivo con la alerta ocurrida.

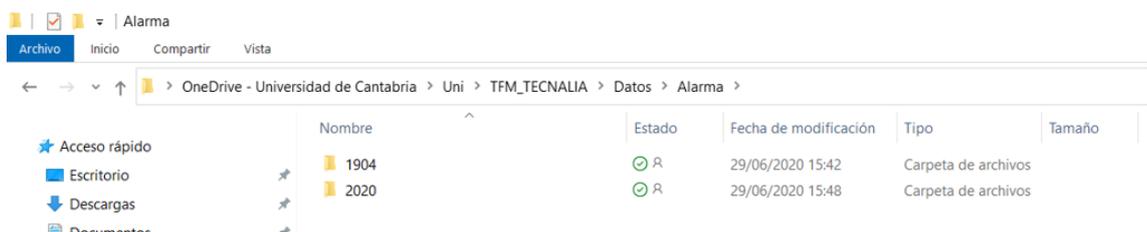


Figura 47. Carpeta de alertas

9. Almacenamiento de los datos del evento

Tras la generación de la alerta se almacenan los datos del evento. Para ello en primer lugar el propio programa crea las carpetas de año y mes en las que se guardarán los datos de los eventos.



Figura 48. Carpeta de "Eventos Extraordinarios"

10. Envío de aviso por mail

En último lugar, se envía un mail al destinatario introducido al comienzo en el panel frontal, con los datos del evento adjuntos y un mensaje que incluye la fecha del evento.



Figura 49. Mail enviado por el programa

6 CONCLUSIONES

En este TFM se ha creado una APP para la gestión de alarmas en puentes en fase de explotación equipados con un sistema de SHM. Es una APP robusta, escalable y fácilmente integrable en sistemas más complejos.

A continuación se resumen conclusiones adicionales obtenidas tras el desarrollo del presente Trabajo Fin de Máster acerca del uso e implantación de sistemas de monitorización estructural en puentes, y concretamente en las primeras fases de adquisición y tratamiento de datos.

6.1 CONCLUSIONES SOBRE EL CONTEXTO TEÓRICO

- La importancia del estudio durante el proyecto de una estructura del uso de un sistema de monitorización, de forma que el coste de implantación y mantenimiento del sistema sea mucho más rentable que una implantación futura. Igualmente, el ahorro en mantenimiento en la estructura gracias a la información aportada por el sistema.
- El programa elaborado mediante LabView puede ser adaptado para su uso con otro tipo de sensores, así como diferentes tecnologías.
- Se trata de un sistema aplicable a otro tipo de estructuras como puede ser edificación, muros de contención... y también para estructuras eólicas y offshore, que normalmente se encuentran en sitios más remotos.
- Se trata de una herramienta muy buena para los sistemas de gestión de puentes de forma que se pueda obtener un segundo nivel de alarma que permita tomar decisiones en cuanto a su uso y mantenimiento desde el punto de vista de la seguridad estructural y la funcionalidad.

6.2 CONCLUSIONES SOBRE LA ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS

- La adquisición de datos entra dentro del concepto del “Internet de las cosas” abreviado como “IoT” por sus siglas en inglés (Internet of things) de forma que permita una interconexión digital que permita el acceso a nuevos datos para poder ser estudiados y gestionados por otros equipos.
- Para la propia adquisición como para el posterior tratamiento, es muy importante crear un sistema que sea capaz de identificar la información verdaderamente valiosa de la que no lo es, ya que el tratamiento de la misma puede ser muy pesado computacionalmente y precisar de más medios que se traducen en mayor coste económico. Fundamental optimizar los recursos de los que se dispone.



- LabVIEW se trata de un programa con grandes posibilidades de interconexión gracias a sus librerías, que permite trabajar con distintos lenguajes de programación como pueden ser Python, Java...

6.3 FUTUROS TRABAJOS Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

- Desarrollo de un sistema de adquisición de imágenes que permitan visualizar los momentos previos y posteriores a un evento. Estas imágenes se pueden utilizar para desarrollar también un sistema conocido como “Weigh in motion” (Pesaje en movimiento) que permite monitorizar el tráfico sin necesidad de interrumpirlo para utilizar estos datos para planificación vial, nuevas técnicas de materiales y construcción de las estructuras...Puede ser aplicable también a estructuras ferroviarias.
- Estudio de la rentabilidad del tamaño de la extensión de una red de monitorización. Está dentro del concepto Value of Information (VoI) de sus siglas en inglés)
- Mejora de la interfaz gráfica de estos sistemas para poder presentar la información de forma más visual

7 BIBLIOGRAFÍA

- Ahlborn, T. M., Shuchman, R. A., Sutter, L. L., Brooks, C. N., Harris, D. K., Burns, J. W., Endsley, K. A., Evans, D. C., Vaghefi, K., & Oats, R. C. (2010). *The state-of-the-practice of modern structural health monitoring for bridges: A comprehensive review*. 48105(734). [http://www.mtri.org/bridgecondition/doc/State-of-PracticeSHMforBridges\(July2010\).pdf](http://www.mtri.org/bridgecondition/doc/State-of-PracticeSHMforBridges(July2010).pdf)
- Felipe, A., Parra, Q., & Mejía, R. V. (2010). ESTADO DEL ARTE EN MONITORIZACIÓN DE SALUD ESTRUCTURAL: UN ENFOQUE BASADO EN AGENTES INTELIGENTES struCtural Health mOnitOring: an intelligent agent aPPrOaCH. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 20(1), 117–132. <http://www.scielo.org.co/pdf/cein/v20n1/v20n1a08.pdf>
- G. Sevillano, E. (2018). Fomento admite que hay 66 puentes con graves problemas de seguridad. *El País*. https://elpais.com/economia/2018/12/08/actualidad/1544297956_635915.html
- García-Sánchez, D. (2016). *Control estadístico y modelos de regresión lineal. Una forma práctica de control de puentes*. 358.
- Garita, C. (2016). Enfoques de integración de información para sistemas de monitoreo de salud estructural de puentes. *Revista Tecnología En Marcha*, 29(1), 96. <https://doi.org/10.18845/tm.v29i1.2542>
- Gaute Alonso, Á. (2019). *Pruebas de carga en puentes, Asignatura de Puentes*.
- Joseph e, K. (2006). *Bridge Inspection and Interferometry*. Worcester Polytechnic Institute.
- Kim, S., Pakzad, S., Culler, D., Demmel, J., Fenves, G., Glaser, S., & Turon, M. (2007). *Health Monitoring of Civil Infrastructures using wireless sensor networks*.
- Martinez Trujano, L. Á., Quintana Rodríguez, J. A., Arroyo Ramírez, B., Carrion viramontes, F. J., Crespo Sánchez, S. E., Hernández Figueroa, J. A., Bonilla Ureña, V. M., Gasca Zamora, H. M., & Hernández Guzmán, A. (2016). *Sistema Inteligente y protocolos de actuación para monitoreo remoto de puentes*. 464, 143.
- Masato, A., & Zhisen Wu. (1998). *Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure*.
- Merchan, J., Tutor, B., Rodr, I. M., Tutor, G., Pi, I., Tutor, E. R. O. S., & Garc, D. (2018). *ANÁLISIS ESTÁTICO Y DINÁMICO EN UN PUENTE A ESCALA A TRAVÉS DE LA MONITORIZACIÓN DE LA SALUD ESTRUCTURAL (SHM)*. Escuela de Ingeniería de Bilbao(UPV/EHU).
- Olazábal Herrero Patricia. (2013). *Tesis Doctoral. La Instrumentación: Una Nueva Forma De Comprender Los Puentes*.
- Olmo, A. F.-N. del. (2018). *Desarrollo de una herramienta de detección de daños para*



la toma de decisión en gestión de puentes. Universidad de Cantabria.

Victor Yepes Piqueras. (2018). *Concepto de Sistema de Gestión de Puentes (SGP)*.
<https://victoryepes.blogs.upv.es/2018/07/02/concepto-de-sistema-de-gestion-de-puentes-sgp/>

ANEJO 1. MODELO DE CÁLCULO

ANÁLISIS DIMENSIONAL

El análisis de modelos reducidos sirve para poder deducir el comportamiento de una estructura real, mediante otra que se ensaya mediante un modelo a escala en el laboratorio. Este modelo a escala no debe tener ni las mismas dimensiones, ni forma ni cargas ni material que la estructura real. Es por ello que las propiedades de del modelo deben ser tales que los resultados puedan ser extrapolados a la estructura real, para lo que se deberá crear una herramienta que permita relacionar los resultados en ambas estructuras.(Merchan et al., 2018)

Teoría general del Análisis Dimensional

En todo fenómeno físico intervienen unas magnitudes físicas medibles, como pueden ser la velocidad, fuerza, aceleración...Estas magnitudes físicas, pueden expresarse en algunos casos en función de un número mínimo de las mismas, como puede ser la fuerza en función de la masa y la aceleración.

Estas magnitudes o unidades, llamadas fundamentales; son el número mínimo de magnitudes físicas mediante las cuales pueden expresarse todas las magnitudes que intervienen en un problema, a las cuales se les llama derivadas.

El conjunto de unidades seleccionado define el sistema de unidades adoptado para el análisis de un caso determinado. En los problemas físicos de utilizan dos tipos de sistemas:

- Sistema c.g.s. Sus unidades fundamentales son la masa, la longitud y el tiempo.
- Sistema práctico. Sus unidades fundamentales son la fuerza, la longitud y el tiempo.

Según la naturaleza del problema a analizar el número de unidades fundamentales puede variar. Puede ser necesario también añadir nuevas magnitudes fundamentales en caso de que la temperatura intervenga en el problema, por ejemplo.

En el caso de que el problema no dependa del tiempo, las magnitudes físicas se reducirían, quitando esa variable del sistema de unidades.

La dimensión de una magnitud física es el número que expresa cómo se obtiene esa magnitud a través de las magnitudes fundamentales. En la siguiente tabla se muestran las magnitudes físicas más comunes en cálculo estructural en los dos sistemas comentados previamente.

MAGNITUD	SÍMBOLO	DIMENSIÓN (Sist. C.g.s)	DIMENSIÓN Sistema práctico
Longitud	l	L	L
Módulo Elasticidad	E	$ML^{-1}T^{-2}$	FL^{-2}
Coeficiente Poisson	ν	-	-
Peso específico	γ	$ML^{-2}T^{-2}$	FL^{-3}
Densidad	ρ	ML^{-3}	$FL^{-1}T^{-2}$
Carga puntual	P	MLT^{-2}	F
Carga repartida en superficie	q	$ML^{-1}T^{-2}$	FL^{-2}
Momento	M	ML^2T^{-2}	FL
Tensión	σ, τ	$ML^{-1}T^{-2}$	FL^{-2}
Deformación	ξ, γ_{xy}	-	-
Desplazamientos	u, v, w	L	L
Giros	φ	-	-

Tabla 9. Magnitudes físicas usuales en el Análisis de Estructuras. (Merchan et al., 2018)

Teorema de Buckingham

El teorema de Buckingham (también llamado de π) dice que una ecuación dimensionalmente homogénea puede reducirse a una relación entre un conjunto completo de números adimensionales. Se trata de algo evidente ya que para que una ecuación sea dimensionalmente homogénea es condición suficiente que la misma ecuación pueda reducirse a una entre productos adimensionales.

De acuerdo con lo anterior, si m es el número de variables que definen un fenómeno físico mediante una ecuación cualquiera, se puede expresar esa ecuación mediante una relación $i=m-r$ productos adimensionales independientes, siendo r el número de unidades fundamentales del problema.

Sean X_1, X_2, \dots, X_m , las magnitudes físicas de un problema y:

$$\rho(X_1, X_2, \dots, X_m) = 0$$

La ecuación desconocida, dimensionalmente homogénea, que las relaciona.



Si r son las unidades fundamentales necesarias para definir las m magnitudes físicas, de acuerdo con el Teorema de Buckingham, la ecuación

$$\rho(\pi_1, \pi_1, \dots; \pi_{m-r}) = 0$$

es equivalente a la ecuación, siendo π_i los números adimensionales independientes formados por una o más magnitudes físicas Q_j .

Se demuestra también que no pueden crearse más de $i=m-r$ grupos adimensionales independientes. Este planteamiento provoca la reducción del sistema de ecuaciones a resolver.

Análisis dimensional de modelos

Sean X_1, X_2, \dots, X_m las magnitudes físicas que intervienen en un fenómeno físico, tanto en la estructura y $\varphi(X_1, X_2, \dots, X_m) = 0$ la relación dimensionalmente homogénea desconocida que lo describe. Si se construye un modelo a escala para estudiar el fenómeno físico, intervendrán las mismas magnitudes físicas X'_1, X'_2, \dots, X'_m y la relación que lo describa será la misma $\varphi(X'_1, X'_2, \dots, X'_m) = 0$. De acuerdo con el teorema de Buckingham, el fenómeno físico puede expresarse de la siguiente forma:

$$\rho(\pi_1, \pi_1, \dots; \pi_{m-r}) = 0 \rightarrow \text{Estructura real}$$

$$\rho(\pi'_1, \pi'_1, \dots; \pi'_{m-r}) = 0 \rightarrow \text{Modelo}$$

La solución de la ecuación ρ es única, por lo que al ser sus argumentos adimensionales debe cumplirse:

$$\pi_1 = \pi'_1; \pi_2 = \pi'_2, \dots; \pi_{m-r} = \pi'_{m-r}$$

Las igualdades anteriores indican que mediante los valores obtenidos para $\pi'_1, \pi'_2, \dots, \pi'_{m-r}$ en el modelo puede obtenerse la estructura real.

A continuación, se describen factores clave para poder realizar un modelo de paso preciso:

1. Influencia del número de magnitudes consideradas

El teorema de Buckingham proporciona un método para pasar del modelo al prototipo y al revés, de forma que se pueden establecer relaciones de semejanza entre ambos.

El teorema establece que si m son las magnitudes físicas que intervienen en el fenómeno, es posible describirlo mediante una relación de $m-r$ grupos adimensionales independientes, siendo r el número de unidades fundamentales del problema. Debe tenerse en cuenta la influencia en el análisis de las magnitudes elegidas que participan en el fenómeno y la elección de las unidades fundamentales.

Las siguientes posibilidades y sus consecuencias deben ser estudiadas previo al análisis:

- Menos magnitudes de las necesarias: No se describe completamente el fenómeno físico. Normalmente no sucede porque se conocen a ciencia cierta las magnitudes que participan.
- Más magnitudes de las necesarias: No es un problema, simplemente habría grupos adimensionales que no participan en el fenómeno.
- Menos unidades fundamentales de las necesarias: No es posible porque al conocer las m magnitudes físicas quedan determinadas las magnitudes fundamentales.
- Más unidades fundamentales de las necesarias: Puede afectar a la composición de los grupos adimensionales.

2. Procedimiento en el Análisis Dimensional

- Identificar las m magnitudes físicas. En caso de duda, es mejor considerar más magnitudes.
- Elegir las unidades fundamentales
- Hacer la matriz dimensional del problema
- Comprobar que todas las filas son independientes, y en caso de no serlo; suprimirlas. Quedaría una matriz de n filas.
- Definir los $m-n$ grupos adimensionales independientes del problema.
- A partir de estos grupos, obtener las relaciones entre los factores de escala, y fijar las n escalas.

ESTRUCTURAS SOMETIDAS A CARGAS ESTÁTICAS

En los problemas de análisis de estructuras bajo cargas estáticas participan magnitudes físicas como pueden ser la longitud de una estructura, las acciones que sufre, el módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson, el peso específico del material...

Por otro lado, una estructura sometida a distintas acciones se considera resuelta en el caso de conocer las leyes de esfuerzos, tensiones, deformaciones y movimientos en cualquier punto de la estructura. Es posible por tanto definir todas las m magnitudes físicas que intervienen en el problema.

Una vez se tienen estas magnitudes debe adoptarse uno de los sistemas fundamentales y desarrollar la matriz de dimensiones del problema. Se eliminan las filas linealmente dependientes y se determinan los grupos adimensionales. A continuación, se determinan los factores de escala que van a ser datos del problema y a partir de ellos se determinan el resto de las escalas.



En la siguiente tabla se observa la matriz de dimensiones de un problema de estructuras estático, con sistema de unidades práctico.

	E	v	l	P	q	γ	M	σ	ξ	γ_{xy}	δ	ϕ	γ_a
L	-2	0	1	0	-2	-3	1	-2	0	0	1	0	-3
F	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1

Tabla 10. Matriz de dimensiones de una estructura bajo carga estática (Merchan et al., 2018)

Según la matriz el número de grupos adimensionales es $m-r=13-2=11$:

$$\frac{P}{El^2}; \nu; \frac{q}{E}; \frac{\gamma l}{E}; \frac{M}{Pl}; \frac{\sigma}{E}; \epsilon; \gamma_{xy}; \frac{\zeta}{l}; \phi; \frac{\gamma_a l}{E}$$

Los factores de escala se expresan de la siguiente forma:

$$\lambda_p = \lambda_E \lambda^2; \lambda_q = \lambda_E; \lambda_\gamma = \frac{\lambda_E}{\lambda}; \lambda_M = \lambda_p \lambda = \lambda_E \lambda^3$$

$$\lambda_\sigma = \lambda_E; \lambda_\sigma = \lambda; \lambda_{\gamma_a} = \frac{\lambda_E}{\lambda}$$

$$\lambda_\nu = 1; \lambda_E = 1; \lambda_{\gamma_{xy}} = 1; \lambda_\phi = 1 \rightarrow \text{Valores constantes}$$

Los factores de escala a determinar son 9 mientras las relaciones que se han podido obtener a partir de los grupos adimensionales son 7, por lo que será necesario adoptar dos factores de escala para obtener los restantes.

Los datos que podemos adoptar son la escala de longitud λ_l y la escala de módulos de elasticidad λ_E , ya que sabemos las dimensiones y los módulos de elasticidad tanto del modelo como del puente real. Otras condiciones que se deben cumplir son las siguientes:

- El coeficiente de Poisson debe ser el mismo en el modelo y el puente real.
- Las deformaciones, giros y distorsiones serán las mismas en modelo y puente real.
- La escala de tensiones será igual a la del módulo de elasticidad.
- Si se considera el peso propio de la estructura fuerza másica la condición $\lambda_\gamma = \lambda_E / \lambda$ difícil de cumplir