



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

BASES METODOLÓGICAS PARA IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE
INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO DE SALUD ESTRUCTURAL EN TIEMPO
REAL DE PUENTES EN CHILE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

JOSÉ IGNACIO SEGUEL ANATIVIA

PROFESOR GUÍA:

RODRIGO RETAMALES SAAVEDRA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

FABIÁN ROJAS BARRALES

FRANCISCO HERNÁNDEZ PRADO

SANTIAGO DE CHILE
2019

RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL
POR: JOSÉ IGNACIO SEGUEL ANATIVA
PROF. GUÍA: RODRIGO RETAMALES SAAVEDRA

BASES METODOLÓGICAS PARA IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE
INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO DE SALUD ESTRUCTURAL EN TIEMPO
REAL DE PUENTES EN CHILE

Debido a las consecuencias provocadas por catástrofes naturales y/o por el deterioro progresivo de la red de puentes del país, es necesario implementar sistemas de monitoreo en tiempo real que permitan evaluar la su salud estructural de puentes (SHM, Structural Health Monitoring). La idea detrás del concepto de SHM se relaciona a que esta técnica pudiese prevenir pérdidas de operación de las estructuras y de la red de transporte de la cual forman parte.

La información obtenida por el sistema de monitoreo puede ser utilizada para calibrar modelos de análisis y estimar de mejor manera el comportamiento de las estructuras ante acciones externas. Para esto, el presente estudio realiza una revisión del estado del arte en la materia a nivel nacional e internacional, investigando los diferentes métodos de instrumentación y análisis de datos disponibles, a fin de adaptarlos y aplicarlos a la realidad chilena. Los resultados de la investigación se incluyen en un documento, de carácter preliminar, orientado a estandarizar los sistemas de monitoreo para estructuras de puentes, apuntando a una posible incorporación en el Manual de Carreteras, el principal referente para el diseño, construcción, inspección y mantención de puentes en Chile.

Agradecimientos

Son muchas las personas que han contribuido al proceso y conclusión de este trabajo. En primer lugar, quiero agradecer al profesor Rodrigo Retamales, profesor guía que entregó su apoyo durante todo el transcurso de este proyecto alentándome a concluirlo. Además, quiero agradecer a la empresa Freyssinet Chile que fue la responsable de presentar este tema como tesis de pregrado, junto con Alex Unión, representante del Ministerio de Obras Públicas que facilitó toda información solicitada y presentó un gran interés.

Gracias a mis padres por acompañarme y darme el ánimo necesario para sacar adelante la carrera de ingeniería civil; a Francisco, mi hermano, por los momentos de ocio; y a Camila por darme a entender que con esfuerzo uno es capaz de cumplir todo lo que se proponga.

Un especial agradecimiento a todos los compañeros de universidad, amigos y compañeros de escalada que han sido un apoyo mental fundamental en el transcurso de mi carrera universitaria.

Sin su apoyo este trabajo nunca se habría escrito, muchas gracias.

Tabla de Contenido

Capítulo 1:	Introducción	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Objetivo General	2
1.3	Objetivos Específicos.....	2
Capítulo 2	: Diseño Genérico de un Sistema de Monitoreo Estructural	3
2.1	Introducción.....	3
2.1.1	<i>Ciclo de vida ingenieril de puentes (life cycle engineering LCE)</i>	4
2.1.2	<i>Diseño genérico de un Sistema de Monitoreo Estructural</i>	5
2.2	Caracterización de Estructura	6
2.2.1	<i>Análisis de acciones</i>	7
2.2.1.1	Cargas Estáticas	7
2.2.1.2	Cargas Dinámicas	8
2.2.2	<i>Caracterización de las acciones</i>	8
2.2.3	<i>Objetivos y análisis de acciones</i>	8
2.2.4	<i>Descripción de diseño y construcción de la estructura.</i>	9
2.3	Identificación del fenómeno a medir.....	9
2.3.1	<i>Determinación de acciones basadas en dimensión, duración y efectos locales.</i>	9
2.3.2	<i>Determinación de acciones</i>	10
2.3.2.1	Cargas de Viento	10
2.3.2.2	Cargas de Tráfico	11
2.3.2.3	Cargas por desplazamientos	12
2.3.2.4	Cargas de Peso	13
2.3.2.5	Cargas por impacto, vibraciones o sismos	13
2.3.3	<i>Patrón de monitoreo</i>	13
2.3.3	<i>Procedimientos locales</i>	14
2.3.4	<i>Procedimientos Globales</i>	14
2.3.5	<i>Identificación de Daños</i>	15
2.3.5.1	Objetivos y procedimientos	15
2.3.5.2	Definición de daño	15
2.3.5.3	Clasificación de daño y mecanismos de daño	16
2.3.5.4	Causas generales de daño	16
2.3.6	<i>Niveles de identificación de daños</i>	16
2.3.7	<i>Definición de parámetros de rendimiento y valores límites para monitoreo</i>	17
2.3.8	<i>Determinación de valores límites para estabilidad y servicio</i>	17
Capítulo 3	: Adquisición y Manejo de Datos.....	19
3.1	Selección de Sensores	19
3.1.1	<i>Acelerómetros.</i>	19
3.1.2	<i>Fibra óptica</i>	22
3.1.2.1	Tipos de Fibras ópticas	22
3.1.3	<i>GPS</i>	24
3.1.4	<i>Sensores de Emisiones Acústicas</i>	26
3.1.5	<i>Galgas extensiométricas (Strain Gauges)</i>	28
3.1.6	<i>Inclinómetros</i>	29

3.2	Posicionamiento óptimo de sensores	30
3.3	Sistema de Adquisición de Datos	31
	3.3.1 <i>Uso y análisis de datos.</i>	31
	3.3.2 <i>Modelos de carga.</i>	31
	3.3.3 <i>Equipos de acondicionamiento de señales</i>	32
	3.3.4 <i>Medidas estáticas</i>	32
	3.3.5 <i>Medidas Dinámicas</i>	32
	3.3.6 <i>Sistema de adquisición de datos</i>	32
	3.3.6.1 <i>Arquitectura del sistema</i>	33
	3.3.6.2 <i>Red de Sensores Inalámbricos</i>	34
	3.3.6.3 <i>Tecnologías de transmisión de datos</i>	35
	3.3.6.4 <i>Software</i>	36
3.4	Manejo de Datos y Procesamiento de Datos	36
	3.4.1 <i>Análisis de la señal</i>	36
4.	Análisis de Salud y Diagnóstico de la Estructura.....	37
4.1	Análisis numérico	37
4.2	Calibración de modelos estructurales	37
4.3	Procedimientos Dinámicos	37
	4.3.1 <i>Métodos basados en la frecuencia natural</i>	38
	4.3.2 <i>Métodos basados en la forma modal</i>	39
	4.3.3 <i>Métodos basados en emisiones acústicas</i>	40
	4.3.4 <i>Métodos basados en la Transformada de Fourier</i>	40
	4.3.5 <i>Métodos basados en la transformada de Wavelet</i>	41
	4.3.6 <i>Métodos basados en modelos autorregresivos</i>	42
4.4	Definición de Alarmas	42
5.	Análisis de Tipología de puentes Nacionales.....	44
5.1	Estudio de Red vial crítica.....	44
5.2	Análisis de daños en Tipología seleccionada	47
	5.2.1 <i>Daños observados durante el Terremoto 27/F</i>	47
5.3	Metodologías de Inspección de puentes	49
	5.3.1 <i>Manual de carreteras</i>	49
	5.4 <i>Parámetros y clasificación de deterioros de puentes</i>	53
	5.5 <i>Prototipo de sistema de monitoreo para tipología seleccionada</i>	57
	5.5.1 <i>Identificación de parámetros</i>	57
	5.5.2 <i>Selección de sensores</i>	57
	5.5.3 <i>Sistema de adquisición de datos</i>	61
	5.5.4 <i>Análisis de Salud y Diagnóstico</i>	62
6.	Documento técnico.....	63
6.1	Antecedentes Generales	63
6.2	Consideraciones	64
6.3	Caracterización de una estructura para fines de instrumentación	69
6.4	Selección de sensores.....	70
6.5	Posicionamiento óptimo de sensores	72
6.6	Sistema de adquisición de datos	73

6.7	Manejo de Datos y Procesamiento de Datos.....	74
6.8	Métodos dinámicos para el análisis de salud y diagnóstico de la estructura	75
6.8.1	<i>Métodos basados en la frecuencia natural</i>	75
6.8.2	<i>Métodos basados en la forma modal</i>	76
6.8.3	<i>Métodos basados en emisiones acústicas</i>	77
6.8.4	<i>Métodos basados en la Transformada de Fourier</i>	77
6.8.5	<i>Métodos basados en la transformada de Wavelet</i>	78
6.8.6	<i>Métodos basados en estudio estadísticos</i>	79
6.9	Definición de alarmas	80
7.	Análisis de Resultados y Conclusiones	81
7.1	Análisis de Resultados	81
7.2	Conclusiones.....	83
7.3	Recomendaciones a trabajo futuro.....	84
8.	Bibliografía	85
Anexos		91
Anexo A	91	
	<i>A.1 Análisis Modal</i>	91
	<i>A.1.2 Aplicaciones</i>	92
	<i>A.2 Emisiones Acústicas</i>	93
Anexo B	98	
	<i>B.1 Bridge Weight in Motion</i>	98

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2-1: FALLAS PROBABLES EN PUENTES (AHLBORN, 2010).....	7
TABLA 3-1: RESUMEN SENSORES.....	19
TABLA 3-2: COMPARACIÓN DE RED SENSORES CONECTADA E INALÁMBRICA (NOEL, ET AL., 2017)..	34
TABLA 5-1: RESUMEN DE LOS PUENTES DE LA RED VIAL NACIONAL A DICIEMBRE DE 2015.....	44
TABLA 5-2: RESUMEN MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN DE DIFERENTES ELEMENTOS DE LOS PUENTES	45
TABLA 5-3: RESUMEN Y PORCENTAJE TOTAL DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.	46
TABLA 5-4: EJEMPLO DE FICHA DE INSPECCIÓN DE PUENTES (MOP, 2012).	50
TABLA 5-5: PARÁMETROS RELEVANTES DE DETERIOROS SEGÚN ELEMENTOS DEL PUENTE (MOP, 2019).....	53
TABLA 5-6: CLASIFICACIÓN DE DETERIOROS SEGÚN ELEMENTOS DEL PUENTE (MOP, 2019).	55
TABLA 6-1: PARÁMETROS DE DETERIOROS SEGÚN ELEMENTOS DEL PUENTE (MOP, 2019).....	65
TABLA 6-2: CLASIFICACIÓN DE DETERIOROS SEGÚN ELEMENTOS DEL PUENTE (MOP, 2019).	67
TABLA 6-3: SELECCIÓN DE SENSORES.	70

Índice de Figuras

ILUSTRACIÓN 2-1 CICLO DE VIDA TÍPICO DE UNA ESTRUCTURA	5
ILUSTRACIÓN 2-2: CONCEPTO DE WIM (LYDON, ET AL., 2016).....	12
ILUSTRACIÓN 2-3 MAPA CONCEPTUAL DE UN SHM (YI CHENG, 2017).	15
ILUSTRACIÓN 3-1: MODELO TEÓRICO DE ACELERÓMETRO MEMS (GOMEZ, 2010).	20
ILUSTRACIÓN 3-2: EJEMPLO DE ACELERÓMETRO	21
ILUSTRACIÓN 3-3: EJEMPLO DE MULTIPLEXER, FUENTE: HTTP://WWW.MICRONOPTICS.COM/PRODUCT/OPTICAL-SENSING-INSTRUMENT-SI155/	23
ILUSTRACIÓN 3-4: COMPARACIÓN SENSORES AE: PIEZOFILM Y MEMS (YAPAR, ET AL., 2015)	28
ILUSTRACIÓN 3-5: GALGA EXTENSIOMÉTRICA PARA CONCRETO. FUENTE: HTTPS://TML.JP/E/PRODUCT/STRAIN_GAUGE/CONCRETE.HTML	29
ILUSTRACIÓN 5-1: REPRESENTACIÓN DE TIPOLOGÍA SELECCIONADA	46
ILUSTRACIÓN 5-2 CARACTERIZACIÓN DE DAÑOS OBSERVADOS DURANTE TERREMOTO DEL MAULE DEL 27 DE FEBRERO DE 2010.	48
ILUSTRACIÓN 5-3: CAMIÓN INSPECCIÓN MOP (MOP, 2019).....	58
ILUSTRACIÓN 5-4: VISTA SUPERIOR DE INSTALACIÓN DE SENSORES.	60
ILUSTRACIÓN 5-5: VISTA CORTE A L/2, INSTALACIÓN DE SENSORES	61
ILUSTRACIÓN 5-6: VISTA CORTE A L/4 INSTALACIÓN DE SENSORES	61
ILUSTRACIÓN A.0-1: CALIFICACIÓN DE DAÑO EN CONCRETO EN FUNCIÓN DE LA RAZÓN DE CARGA Y LA RAZÓN DE QUIETUD.....	97

Capítulo 1

Introducción

1.1 Motivación

En la última década, se ha observado que más de 70 puentes en Chile han presentado distintos grados de deterioro y daño causados por sismos, causados por crecidas de ríos u otros efectos ambientales (Buckle, et al., 2012). Por esta razón, resulta recomendable implementar sistemas de monitoreo de la salud estructural de puentes, que en caso de detectar daños, reporten en tiempo real las posibles variaciones de propiedades nominales de la estructura (y/o el daño observado). La detección de daño permitiría tomar medidas de mitigación tempranas como lo son intervenir o reparar la estructura a fin de evitar la progresión de los daños y prevenir la pérdida de operación de la red de transporte (Yangtao, 2010). Es por esto, que la propuesta de esta tesis es desarrollar un documento que presente una revisión del estado del arte de cómo se efectúa actualmente este tipo de monitoreo en diferentes países, con el afán de definir las tipologías de estructuras a instrumentar, definir las características de la instrumentación a implementar, y establecer los datos a registrar y las características del monitoreo, proceso y análisis de datos que entreguen información sobre el estado de los puentes críticos para la operación de la red vial chilena.

El monitoreo de salud estructural, o SHM (Structural Health Monitoring), consiste en el registro de parámetros que reflejan la condición y rendimiento de una estructura civil, permitiendo evaluar el estado de una estructura, calibrar modelos de análisis y detectar tempranamente daños estructurales y/o no-estructurales (Czichos, 2013).

Para esto, se realizará un estudio del estado del arte tanto a nivel nacional como internacional, enfocado en países donde el sistema haya sido implementado para el monitoreo de puentes. Con la información recopilada se desarrolla un documento que pretende proveer recomendaciones respecto al proceso de análisis de los datos obtenidos por la instrumentación correspondiente y que permita señalar el estado de salud actual de la estructura.

1.2 Objetivo General

Realizar un estudio preliminar de los aspectos a considerar para generar una guía de recomendaciones para llevar a cabo el monitoreo de puentes a partir de instrumentación, considerando el estado del arte para evaluar (estándares internacionales y documentos técnicos) la salud estructural de puentes viales chilenos, desde los diferentes ámbitos necesarios para su correcto funcionamiento.

1.3 Objetivos Específicos

Por consiguiente, los objetivos específicos de la memoria corresponden a:

1. Definir tipología de estructuras que requieren en forma prioritaria sistemas de monitoreo, considerando una red vial crítica que debe presentar un funcionamiento continuo.
2. Definir una estructura que permita implementar el sistema de monitoreo en distintas etapas, considerando requerimientos en cada una.
3. Identificar las características de los instrumentos de medición a considerar y las mediciones que deben efectuar para estandarizar los datos a medir, como por ejemplo desplazamientos, deformaciones, inclinaciones, asentamientos, aceleraciones, esfuerzos en la estructura y socavación, junto con la frecuencia de medición, registro y proceso de datos.
4. Estimar posibles límites para las mediciones obtenidas, que sirvan de alerta para revisar el estado y/o funcionamiento de la estructura y la toma de acción.

Capítulo 2 Diseño Genérico de un Sistema de Monitoreo Estructural

2.1 Introducción

Los puentes corresponden a uno de los elementos más importantes dentro de la infraestructura de transporte a lo largo de todo el mundo, de los cuales depende la sociedad actualmente para mantener su conectividad. Debido a su importancia, es necesario evaluar el estado y conocer la esperanza de vida de los puentes mediante el seguimiento y la evaluación permanente de sus condiciones estructurales. Por lo cual, se requiere monitorear las cargas y condiciones ambientales a las que se encuentra expuesta la estructura. Para esto, existen diferentes herramientas y procedimientos que permiten corroborar la condición de una estructura durante su construcción y operación; entre estas técnicas se reconoce que el monitoreo de salud estructural por medio de instrumentación externa puede ser una herramienta de vital importancia (Wenzer, 2013).

El Sistema de Monitoreo de Salud Estructural realiza una evaluación del estado de una estructura, y uno de sus objetivos se refiere a la posible detección de daños que ocurren durante el tiempo debido a acciones ambientales o por cargas extraordinarias como terremotos, viento fuerte, grandes niveles de escorrentía, efectos térmicos, efectos de hielo, etc. La técnica de SHM tiene como objetivo proveer información que represente el estado de integridad de la estructura y sus componentes. En general, el SHM se lleva a cabo a partir de un conjunto de sensores, el uso de sistemas de almacenamiento y transmisión de datos, y la implementación de un sistema que analice los datos y que entregue una evaluación del estado de la estructura y sus componentes (Ahlborn, 2010). Idealmente, un sistema de SHM debiera basarse en métodos no destructivos (NDE), como el análisis de vibraciones y emisiones acústicas, utilizado para medir los diferentes parámetros dinámicos que describen el comportamiento de las estructuras en el tiempo.

La guía propuesta es tan sólo un primer documento exploratorio, tentativo y de carácter general, que permite efectuar una descripción somera y no necesariamente detallada. La guía propuesta presenta varias deficiencias que pudiesen ser rebatidas desde un punto de vista técnico. Por tanto, la guía expuesta en este documento sirve como una referencia general y no debiera tomarse como definitiva con el objetivo de llevar a cabo la implementación de posibles sistemas de SHM de puentes. La guía de recomendaciones propuesta requiere de la revisión detallada de expertos y de la incorporación de varias descripciones y metodologías que no han sido incluidas en el documento expuesto.

El objetivo del monitoreo de salud estructural (SHM) es monitorear el comportamiento de una estructura precisa y eficientemente, para verificar su rendimiento bajo diferentes cargas de servicio, detectar daño o deterioro con el afán de determinar su condición general. Este sistema debe ser capaz de entregar información para ser incorporada en las estrategias de mantención y manejo de la estructura. Es necesario considerar que una menor cantidad de sensores con un análisis adecuado de los datos es mejor que un sistema complejo de muchos sensores con un análisis deficiente. Finalmente se puede mencionar que el SHM permitiría ahorrar capital a largo plazo y entrega beneficios al proporcionar una evaluación directa del estado de la estructura y sus componentes para la toma de decisiones que conciernen al ciclo de vida de un puente (Enckell, 2011).

Como referente nacional en el ámbito de la instrumentación, se puede mencionar a RENADIC, que corresponde a la red de cobertura nacional de acelerógrafos operado por la división Estructuras-Geotecnia de la facultad Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Esta división posee instrumentos en estructuras para establecer las características de movimientos sísmicos fuerte a nivel nacional, identificar y establecer la demanda sísmica sobre estructuras y monitorear la respuesta sísmica de sistemas estructurales.

2.1.1 Ciclo de vida ingenieril de puentes (life cycle engineering LCE)

El ciclo de vida ingenieril de los puentes comienza con la necesidad de mejorar el sistema de transporte, debido a la demanda a la que este se ve sometido, pasando por un diseño y análisis ingenieril, construcción, uso y desmantelación. A continuación, se describen los pasos del proceso mencionado y sus características (Wenzer, 2013):

- Demanda: Etapa en donde se identifican los nudos críticos de un sistema de transporte en los cuales se excede la capacidad de los elementos.
- Factibilidad: Considera un modelo detallado de desempeño de la estructura. Además, se realizan modelos de factibilidad para identificar restricciones relevantes y establecer la condición actual de la estructura.
- Planeamiento: Considera la toma de decisión respecto de los materiales, sistemas estructurales y métodos constructivos a utilizar.
- Permisos: Autoridades responsables consideran parámetros socioeconómicos que pueden afectar el proyecto.
- Contratación: Búsqueda de empresa capaz de desarrollar el proyecto de manera adecuada y a menor precio.
- Diseño: Etapa en donde se realiza el diseño de la estructura de manera detallada.

- Construcción.
- Operación: costos de mantenimiento, donde mantenencias preventivas suelen tener buenos resultados. Las inspecciones visuales suelen sobreestimar los daños, lo que puede llevar a costos innecesarios. En este contexto la SHM puede ayudar a optimizar el proceso.
- Actualización: Las cuales pueden ser optimizadas desde el modelo de desempeño. Idealmente la estructura debería estar equipada con un sistema de monitoreo permanente.
- Intervenciones.
- Desmantelamiento.

La experiencia ha demostrado que costos (construcción, mantenimiento, reparación) a lo largo del ciclo de vida de los puentes pueden variar desde 150 a 500%, dependiendo de parámetros directamente relacionados con conceptos de mantención que requieren de una inspección técnica adecuada, como SHM, que permiten disminuir estos costos (Wenzer, 2013).

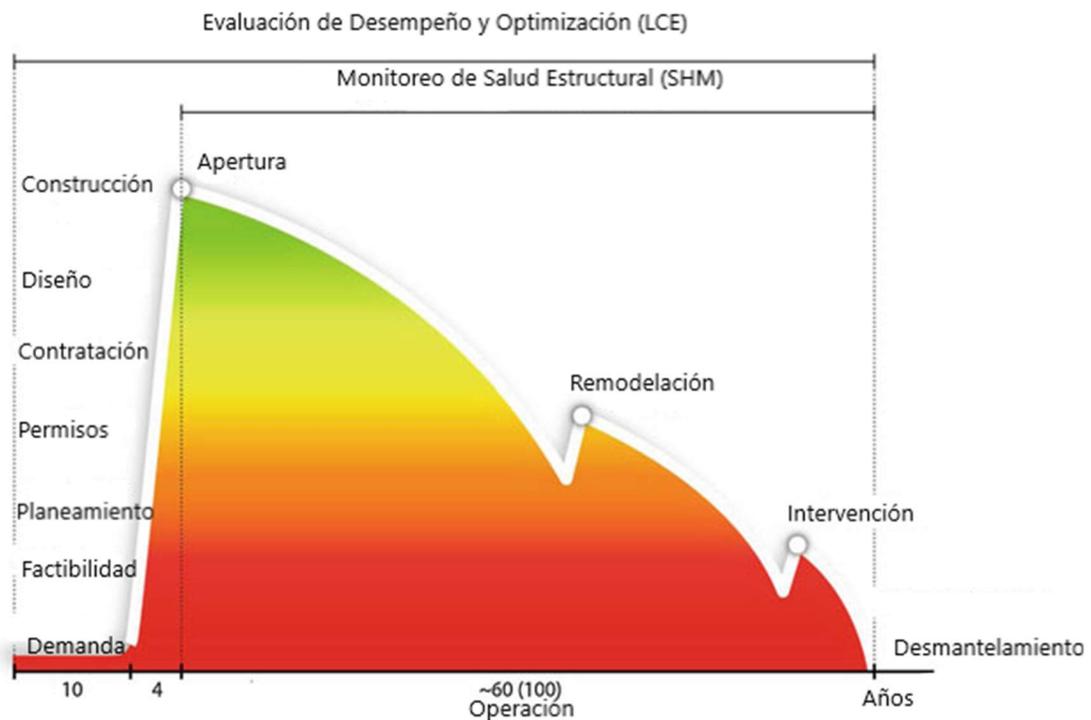


Ilustración 2-1 Ciclo de vida típico de una estructura

2.1.2 Diseño genérico de un Sistema de Monitoreo Estructural

Un sistema de monitoreo de salud estructural se basa en diferentes instrumentos, sistemas de comunicación, análisis numéricos y computacionales, entre otros, que entregan un diagnóstico de la estructura que se está monitoreando, con el objetivo de detectar comportamientos inusuales indicativos del inadecuado funcionamiento de la estructura. A continuación, se describe un diseño genérico para un sistema de monitoreo de salud estructural (Czichos, 2013):

1. Caracterización de la estructura: Corresponde a la etapa donde se describe la información de diseño, cargas, mantenciones, etc., para lo cual es necesario considerar:

- Dimensiones físicas.
- Determinación de rangos esperables de deformaciones y cargas.
- Estudio de condiciones ambientales a las que se verán enfrentados los sensores.

2. Identificación del fenómeno a medir: Etapa donde se determinan los efectos internos y externos provocados por las cargas en la estructura y se definen los puntos de la estructura donde se medirán estos parámetros.

3. Selección de sensores: Etapa donde se debe identificar las condiciones a las cuales se verán afectados los sensores y los sensores a utilizar.

4. Sistema de adquisición de datos: Para la implementación de este sistema, se debe considerar el hardware, software, precisión, velocidad, resolución y el sistema de comunicación entre los diferentes instrumentos.

5. Manejo de datos y selección del método de procesamiento de la señal: En esta etapa se realiza una normalización y acondicionamiento de la señal, mediante filtros. Junto con esto, se pueden representar los resultados en términos cualitativos o en forma probabilística (en caso que estos sean variables).

6. Análisis de salud y diagnóstico: Como etapa final, se realiza un análisis de salud de la estructura, donde los daños de mayor envergadura pueden ser detectados por métodos estadísticos, mientras que para una detección temprana de daños se requiere de métodos de procesamiento de datos como el análisis de wavelet, análisis modal, de vibración, entre otros. El diagnóstico apunta a clasificar la ubicación, el tamaño y el tipo de daño. Finalmente, se deben presentar datos de manera tal que sea comprensible y fácil de entender.

2.2 Caracterización de Estructura

La caracterización de una estructura consta del dimensionamiento de la estructura, en donde se requiere conocer las dimensiones tanto de la estructura como de sus elementos, junto con la inspección de ésta para conocer su condición actual, la cual se puede realizar de diversas maneras, por ejemplo, mediante una inspección visual y/o a través de la construcción de un modelo computacional de la estructura, y estimar cuáles serán las fallas esperables de la estructura (Wenzer, 2013), aunque existe casos de puentes antiguos donde los planos no existen y se generan incertidumbres sobre sus mediciones, en especial de las fundaciones, las cuales no pueden ser medidas con gran precisión. En la Tabla 2-1, se pueden observar algunos daños frecuentes de acuerdo a los principales materiales utilizados en la construcción de los puentes (Ahlborn, 2010).

Tabla 2-1: Fallas probables en puentes (Ahlborn, 2010)

Material	Fallas Probables
Hormigón Armado	Socavación, fisuramiento de las cepas, agrietamiento del tablero, corrosión de armaduras, pérdida de pretensado, impacto longitudinal entre estribo-tablero, impactos con topes sísmicos, impactos de escombros, daño de topes sísmicos, movimiento residuales de tableros (longitudinal o transversal), daños en elastómeros, corte o deformación de barras antisísmicas, deformación del tablero, daño por impactos debido a accidentes, daños en juntas sísmicas, impactos entre secciones de tableros, efectos de retracción por temperatura, efectos de filtraciones de agua y escurrimiento, daños debido al mal uso o por efectos externos producidos por personas, etc.
Acero	Corrosión, socavación, agrietamiento por fatiga, daño por temperatura, daño por colisión.
Madera	Efectos ambientales, insectos, contaminación química, fuego.

2.2.1 Análisis de acciones

Las acciones estructurales que ocurren en una estructura corresponden a cargas, deformaciones y desplazamientos, los cuales son resultantes de la interacción de la estructura con el ambiente al cual se encuentra constantemente sometida. Estas acciones causan esfuerzos en los materiales y deben estar consideradas en el diseño de la estructura.

Las acciones en una estructura se pueden clasificar como mecánicas, térmicas o físico-mecánicas, que actúan como cargas externas o se desarrollan al interior o al exterior de la estructura. Estas acciones pueden generar efectos de carga estáticos o dinámicos (SAMCO, 2006).

2.2.1.1 Cargas Estáticas

Una carga estática es una acción estacionaria de una fuerza o un momento que actúan sobre una estructura. Para que sean estáticos deben poseer magnitud, dirección y punto/s de aplicación que no varíen con el tiempo. Las cargas estáticas se pueden dividir en:

- Cargas dependientes de la estructura: incluyen cargas como peso propio de la estructura y sus componentes, instalaciones, esfuerzos de pretensados, deslizamientos y cargas constructivas, entre otras.
- Cargas de uso: materiales de construcción y cargas de grúas y equipos requeridos para tareas de mantención, entre otras.

- Cargas medioambientales: empuje del suelo, cargas estáticas de fluidos, presión de aguas subterráneas, nieve, hielo, temperatura, asentamiento de fundaciones y socavación de pilas, entre otras.

2.2.1.2 Cargas Dinámicas

Las cargas dinámicas corresponden a cargas que actúan sobre una estructura de manera repentina, variando su magnitud y ubicación en el transcurso del tiempo. Se pueden dividir en:

- Cargas de uso: tráfico, maquinaria.
- Cargas medioambientales: viento, sismos, avalanchas, agua, crecidas de ríos, impactos de escombros, etc.
- Cargas externas: vibraciones, choques (vehículos, aviones, barcos), explosiones.

2.2.2 Caracterización de las acciones

Las acciones se pueden caracterizar como cargas muertas o carga vivas. Las cargas muertas corresponden a acciones estacionarias con cambios lentos, como peso propio, asentamiento de columnas, pretensado y empuje del suelo, entre otros. Por otro lado, las cargas vivas, corresponden a acciones que no se presentan de manera permanente, pero generan cambios esenciales frecuentemente, como viento, temperatura y nieve, etc.

2.2.3 Objetivos y análisis de acciones

Es fundamental conocer las cargas aplicadas a una estructura ya que es la base para evaluar la capacidad de ésta, lo cual, a la vez, permite realizar y actualizar modelos computacionales que pueden ser usados para determinar límites de fatiga y tiempo de vida residual de los componentes de una estructura. Para esto se requiere conocer el comportamiento de la estructura a monitorear frente a las influencias externas (cargas). Este conocimiento de la estructura permite realizar las siguientes tareas (SAMCO, 2006):

- Desarrollar modelos estadísticos a largo plazo de las cargas de tránsito.
- Determinar factores dinámicos de cargas, conociendo el tipo, ubicación, amplitud, duración y frecuencia de las cargas activas. En modelos más sensibles, se puede conocer los límites de fatiga y vida residual de una estructura vulnerable.
- Mejorar modelos, que durante el diseño sólo se pueden estimar en forma aproximada.
- Concluir sobre cargas medioambientales, como excitación aerodinámica, temperatura y cargas dinámicas como sismos.

Usualmente, no es necesario conocer todas las acciones presentes en una estructura, sino que los cambios temporales y espaciales relacionados con el monitoreo del estado y los esfuerzos que se

presentan en la estructura, lo cual se aplica particularmente al análisis de daños (Czichos, 2013). En general, las estructuras están diseñadas para no presentar daño cuando están sujetas a cargas operacionales (o normales). Sin embargo, las estructuras pueden sufrir daños cuando se ven sujetas a cargas extraordinarias y/o debido a acciones dinámicas que puedan generar fatiga (en la medida que su resistencia sea baja).

2.2.4 Descripción de diseño y construcción de la estructura.

La comprobación de las características dimensionales y de construcción sirve de base para evaluar la capacidad de carga, para mantenimiento y para chequear daños de la estructura. El propósito de esta comprobación es registrar todos los valores geométricos necesarios para la descripción de la estructura y su ambiente. Por ende, se deben considerar todos los elementos estructurales, junto con la pérdida de material por corrosión u otros efectos. Una descripción correcta del sistema permite:

- Identificar los elementos estructurales que están más solicitados.
- Identificar acoplamiento y conexiones de elementos y sus propiedades mecánicas.
- Identificar detalles constructivos.
- Determinar propiedades de los materiales.
- Evaluar funcionalidad de elementos y juntas.
- Identificar cargas existentes y su efecto espacio-temporal.
- Determinar puntos problemáticos y deficiencias.
- Identificar daños y causas.

2.3 Identificación del fenómeno a medir

Una vez se conocen las principales características de la estructura (dimensiones, cargas y estado actual), es necesario definir cuáles serán los parámetros que se medirán, ya sea para un monitoreo global o local de la estructura. Se requiere conocer los efectos que generan las cargas en la estructura, dado que una vez conocidos los efectos de las cargas se pueden cuantificar las cargas. Debido a estos efectos provocados por las cargas, se generan daños, los cuales pueden ser independientes del tiempo (sismo, impacto) o dependientes del tiempo (corrosión, socavación), y el monitoreo puede ser capaz de detectar daño en la estructura, localizarlo, cuantificarlo y predecirlo dependiendo del nivel de complejidad del sistema de monitoreo (Yi Cheng, 2017).

2.3.1 Determinación de acciones basadas en dimensión, duración y efectos locales.

Las medidas necesarias para la determinación de los efectos de las cargas están ajustadas de acuerdo con las condiciones físicas y de las cargas que han sido consideradas para el diseño estructural o evaluación. A continuación, se analizan diferentes medidas para sus respectivas cargas:

- Los parámetros de cargas estáticas se pueden determinar conociendo la distribución de masa a lo largo y alto de la estructura.
- Los efectos térmicos requieren conocimiento sobre la distribución de temperatura a lo largo de la estructura y las condiciones climáticas del lugar.
- Las fuerzas de restricciones debido a desplazamientos provocados por asentamientos o cambios espaciales en los estribos (o cepas) usualmente son resultados de cargas constantes y variables que ocurren simultáneamente. Para su evaluación se requiere una investigación metrológica (dimensiones) de los respectivos desplazamientos y/o tener un modelo geotécnico que permita predecir estos valores a partir de las cargas externas.
- La resistencia que se desarrolla en la estructura frente a cargas provocadas por viento o agua, causan reacciones en la estructura, donde la magnitud de las cargas es función de la energía cinética de los flujos medios (Flow media) y la superficie de transmisión (área de contacto del flujo y la estructura). Para identificar estas acciones, es necesario establecer la distribución de velocidades de flujo y su interacción fluido-dinámica con la estructura (agua o viento).
- Las cargas de tráfico que tienen componentes dinámicas (al ser cargas móviles) requieren de sistemas de mediciones para determinar sus efectos en la estructura (e.g., los puentes chilenos suelen diseñarse para soportar la carga móvil un camión estándar HS 20-44 +20% según el Manual de Carreteras y/o el estándar AASHTO). Generalmente se miden tensiones y deformaciones de la estructura para comparar resultados (dado que son cargas gravitacionales influyen en el tablero, como lo es el comportamiento de vigas pre- o postensadas). A la vez, es importante conocer el flujo de tráfico, mediante la medición de la velocidad de movimiento y distancia entre vehículos, de manera de verificar posibles efectos de fatiga y/o pérdida de tensado de los tendones que son empleados para vigas pretensadas.
- Vibraciones, colisiones, explosiones y cargas sísmicas generan efectos dinámicos correspondientes en magnitud y en propiedades dinámicas con las cargas y la estructura. Para esto, es necesario medir velocidades y aceleraciones de vibraciones.

2.3.2 Determinación de acciones

La determinación de los efectos provocados por las acciones que afectan la estructura varía directamente dependiendo del tipo de carga a la cual se ve afectada. Dentro de las cargas más comunes se encuentran:

2.3.2.1 Cargas de Viento

El monitoreo de las cargas de viento corresponde a una de las aplicaciones más importantes en puentes de grandes luces, ya que estas suelen ser las estructuras que se ven más afectadas por este tipo de carga. En este contexto, el diseño aerodinámico de puentes colgantes y atirantados suelen tener en cuenta un análisis riguroso como son el uso de túneles de viento en modelos a escala.

Las cargas de viento pueden ser determinadas mediante la instrumentación de pilares, mástiles o la estructura, mediante anemómetros y veletas que permiten determinar la velocidad del viento y su

dirección. En conjunto se pueden usar sensores para medir la respuesta estructural debido a las cargas de viento (como acelerómetros, strain gauges, etc.), de manera tal que se pueda determinar los efectos del viento en el puente (Mayorga, 2016).

2.3.2.2 Cargas de Tráfico

Las cargas de tráfico generan componentes dinámicos, que producen efectos locales y globales en los esfuerzos de la estructura. Al monitorearlas se puede conocer sus consecuencias sobre la estructura.

Junto con esto, se determinan las cargas dinámicas de tráfico, donde los esfuerzos dinámicos son el resultado entre la interacción de la estructura y todos los vehículos sobre ella.

Las cargas en los ejes de la estructura y configuraciones atípicas de carga en el puente pueden ser también determinados con sistemas especializados para medir el peso de vehículos mientras ellos circulan sobre carreteras como los sistemas WIM (weight in motion) que funcionan según lo observado en la figura 2-2 (Lydon, et al., 2016). Los sistemas WIM, que facilitan el pesaje automatizado de vehículos, en especial cuando el tráfico es denso, se describen en el

Anexo B.

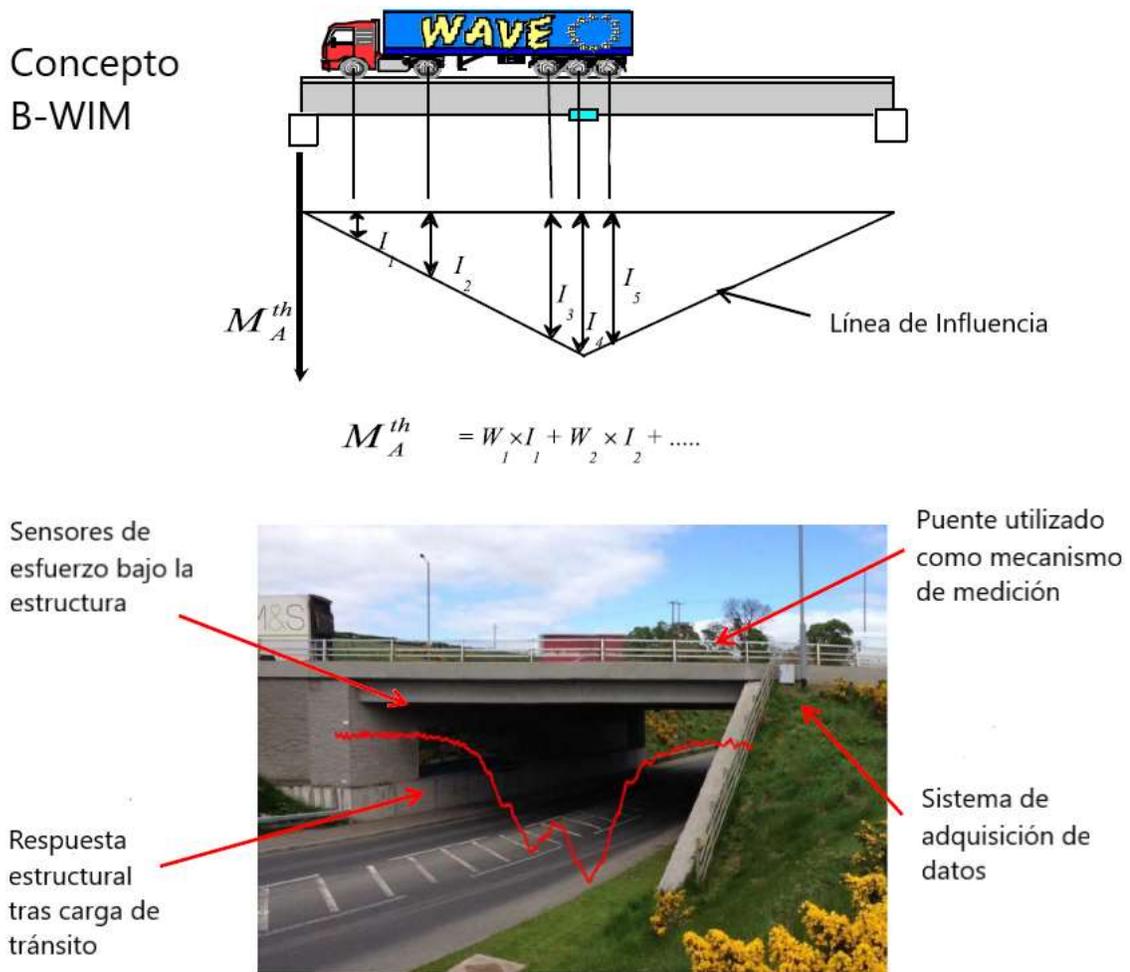


Ilustración 2-2: Concepto de WIM (Lydon, et al., 2016).

Cabe mencionar que el colapso o daño de puentes debido a cargas de tráfico ha ocurrido cuando los vehículos que transitan superan la capacidad de proporcionada por el puente, por efectos de fatiga en algunos componentes (como puentes atirantados) y/o una combinación con efectos de deterioro debido a acciones a largo plazo como la corrosión o asentamientos.

2.3.2.3 Cargas por desplazamientos

Las cargas por desplazamientos ya sean por elevaciones o asentamientos, provocados por cambios en el suelo u otros, generan cargas que son, en general, proporcionales a la deformación producida (solo para casos lineales-elásticos), por lo cual se puede determinar las cargas computacionalmente conociendo estas deformaciones. En este contexto, los asentamientos suelen generar esfuerzos residuales que debilitan a la estructura. Si se considera, de acuerdo a lo conversado con empresas dedicadas a la reparación de puentes en Chile, que una de las principales fallas en los puentes del

país es la socavación, es necesario incorporarla dentro de las cargas a medir en los sistemas de monitoreo estructural.

2.3.2.4 Cargas de Peso

Las cargas de peso propio se determinan a partir del volumen de los elementos estructurales y no-estructurales, y sus respectivos pesos específicos. Estas en general no cambian significativamente durante el tiempo, aunque en algunos casos se pueden depositar escombros, materiales y/o suelo sobre la estructura de un puente incrementando el peso propio. En ciertas circunstancias, la continua repavimentación de las calzadas puede incrementar el peso propio de la estructura. Finalmente, las reparaciones y/o inclusión de elementos adicionales en la estructura pueden incrementar en algunos casos el peso propio en comparación a lo considerado en su diseño original.

Las cargas de peso varían debido a cambios volumétricos, por ejemplo, en el caso de la carga de nieve, que genera una capa de cierta altura sobre la estructura, y aplica una sobrecarga que es directamente proporcional al volumen de nieve sobre la estructura.

2.3.2.5 Cargas por impacto, vibraciones o sismos

Las cargas generadas por un impacto contra la estructura provocan un intercambio de energía cinética por energía de deformación en la estructura. En estos casos el efecto de la carga es dinámica y puede generar un comportamiento no-lineal local, pudiendo ocasionar en algunos casos el colapso en la medida que el daño ocasione una falla de un elemento estructural importante (e.g., la columna de la cepa de un puente) desencadenando el colapso progresivo del puente.

Debido a las características del país, los terremotos de intensidades capaces de dañar los componentes o el comportamiento global de un puente, tienen un período de retorno considerable, por lo cual es necesario considerar la posibilidad de ocurrencia de un sismo que afecte la estructura o sistema de monitoreo, donde los instrumentos deben ser capaces de registrar los movimientos anormales que pueden ocurrir durante el transcurso del sismo.

2.3.3 Patrón de monitoreo

En el patrón de monitoreo las acciones deben ser determinadas por mediciones de acuerdo a las magnitudes, frecuencias, y caracterización de su distribución temporal y espacial. El monitoreo es continuo, cíclico, dependiente de eventos o de las cargas aplicadas, donde se registran todos los efectos con sus ubicaciones temporales, o se puede implementar umbrales de activación para que sólo se monitoree en el caso que se sobrepasen límites preestablecidos que puedan estar asociados a demandas significativas y/o tengan un nivel mayor al nivel de ruido o de resolución de los sensores. Para el caso de monitoreo de variables que cambian lentamente, suele ser suficiente el monitoreo en forma periódica.

2.3.3 Procedimientos locales

El monitoreo local se centra en determinar el comportamiento de los puntos vulnerables de la estructura, que se utilizan para:

- Cuantificar el daño y analizar su progresión, permitiendo identificar las consecuencias locales y globales presentes y futuras, por ejemplo el estudio de crecimiento de grietas mediante fibras ópticas (Puentes, 2013), o la socavación de un puente mediante sistemas GPS (Romero, et al., 2012).
- Analizar posibles daños mediante el monitoreo de cargas, por ejemplo, con un sistema Weight in Motion (Myra, 2016).
- Identificar causas de daños, monitoreando los parámetros de daños y los valores que son afectados por éste. La información de las características de daños y sus causas puede ser obtenida mediante relaciones en un contexto temporal, al igual que mediante la magnitud de las mediciones realizadas, cómo por ejemplo, la vigilancia de una grieta, que puede ser afectada por temperatura, vibraciones, asentamientos u otros (SAMCO, 2006).

Para procedimientos locales, las mediciones que se usan son sensibles al tipo de daño o al efecto de los daños mediante indicadores (ancho de grietas, esfuerzos, inclinaciones) donde se prefieren sistemas de monitoreo permanentes que sean capaces de obtener información de la estructura constantemente (SAMCO, 2006).

2.3.4 Procedimientos Globales

Los procedimientos globales tienen como principal función detectar la existencia de daño y permitir localizarlo, de una manera cuantitativa, mediante la recolección de información de la estructura como su aceleración, desplazamiento, deformación y/u otros (Yi Cheng, 2017). Si no se conoce la existencia de daño ni la posición de éste, siempre se deben controlar los parámetros globales de la estructura, lo que se puede desarrollar mediante monitoreo permanente y periódico, o por ensayos de prueba. En la Ilustración 2-2 se presenta un mapa conceptual de un sistema de SHM y se observa cómo se complementa el monitoreo global con el monitoreo local.

Existen dos frentes clásicos de métodos globales, el primero corresponde al método basado en vibraciones de la estructura, el cual requiere de recolección de datos de aceleración, velocidad o deformación, que mediante modelos computacionales se convierten en parámetros modales tales como frecuencias, tasas de amortiguamientos y formas modales de la estructura. El segundo método se basa en las deformaciones de la estructura, donde los datos de rotación, inclinación o deformación se traducen en estados de esfuerzo-deformación que experimenta la estructura (Yi Cheng, 2017).

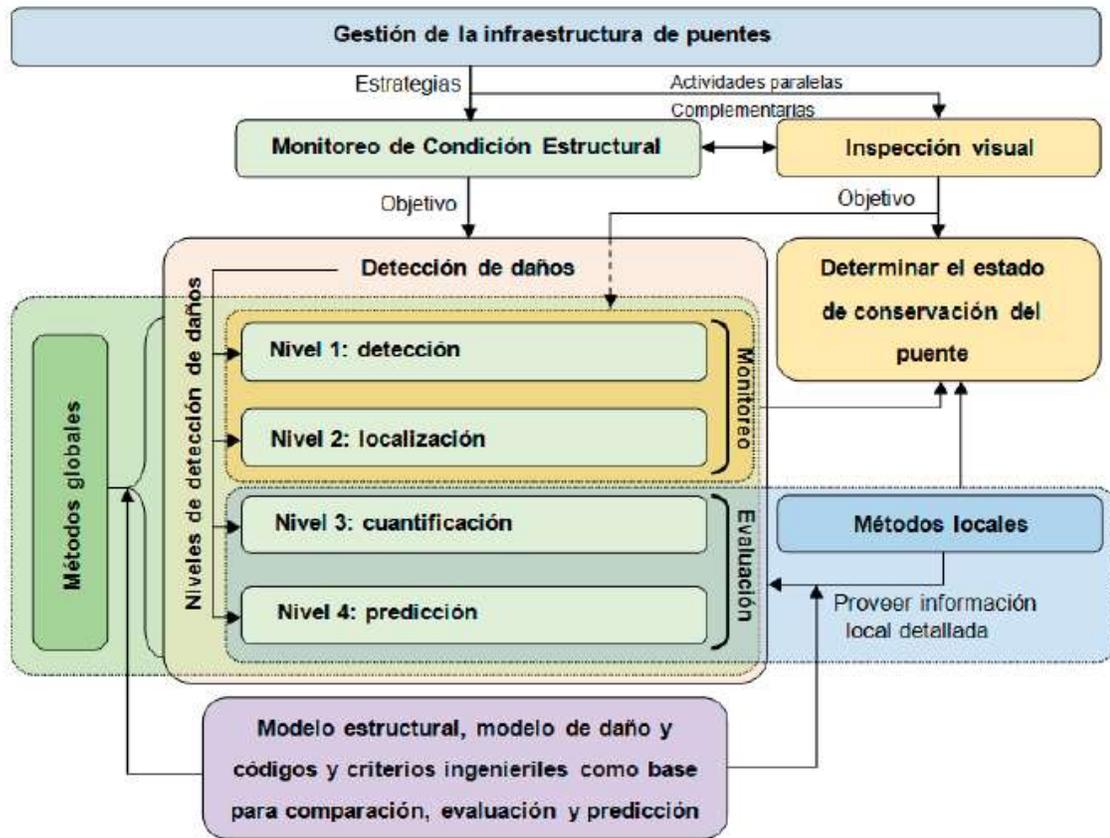


Ilustración 2-3 Mapa conceptual de un SHM (Yi Cheng, 2017).

2.3.5 Identificación de Daños

2.3.5.1 Objetivos y procedimientos

El propósito de la identificación de daños en una estructura es solucionar lo antes posible las afectaciones comprendidas de la estructura. La identificación de daños permite conocer la gravedad de estos, entregándole al ingeniero la información necesaria para conocer el estado de la estructura, saber si se requiere de mantenimiento, o en casos extremos, detener el funcionamiento de la estructura hasta que sea reparada, reforzada o reemplazada. Esto permite evitar riesgos y pérdidas económicas a la sociedad.

2.3.5.2 Definición de daño

El daño se define en función de cómo este afecta el rendimiento de la estructura en el tiempo, lo cual depende de los materiales y las propiedades geométricas de los elementos estructurales. Los cambios en el sistema se desarrollan instantáneamente o por procesos a largo plazo. Daños

dependientes del tiempo se pueden acumular por períodos largos, como por ejemplo la corrosión o la fatiga estructural. Eventos discretos como sismos y cargas vivas pueden generar daños directos.

Los daños se pueden generar localmente o se pueden reconocer como distribuidos. La severidad de los daños se describe a través de medidas geométricas (mediciones geométricas de grietas, etc.), por sus efectos en la capacidad de carga de la estructura o por cambios en la capacidad de disipación de energía de un sistema.

2.3.5.3 Clasificación de daño y mecanismos de daño

Se puede definir el daño de los materiales estructurales como parcial o total, afectando la resistencia de los componentes o de la estructura completa.

2.3.5.4 Causas generales de daño

- Sobreesfuerzo tiempo-independiente: accidentes, sismos, cargas extremadamente altas.
- Cargas regulares con resistencia reducida: debido a la baja de la resistencia de miembros estructurales, los cuales suelen corresponder a procesos dependientes del tiempo, pueden provocarse daños por:
 - Deterioro por cargas químicas: corrosión en acero, reacción sílice alcalina en el hormigón.
 - Deterioro por cargas mecánicas: grietas submicroscópicas, crecimiento de grietas (fatiga), corrosión en cables de pretensado.
 - Deterioro por cargas físicas: daños de polímeros por radiación UV, daño de concreto por congelamiento, daño de materiales por fuego y calor.
 - Agrietamiento, encogimiento y relajación: reducción de esfuerzo de corte por pérdida de pretensión por fluencia del hormigón.

Se puede encontrar más detalle en las **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** que se ubican en la sección 5.4.

2.3.6 Niveles de identificación de daños

La identificación de daños sigue los 4 niveles a continuación:

1. Detección de daño.
2. Localización.
3. Cuantificación: determinar severidad del daño.
4. Pronóstico: predicción de la vida útil de la estructura.

2.3.7 Definición de parámetros de rendimiento y valores límites para monitoreo

La identificación de grandes cargas y parámetros de resistencia en la estructura debido a cargas de tráfico o acciones ambientales (terremotos, tormentas, etc.) es necesaria, ya que estos eventos pueden generar daños considerables a la estructura. Para medir estos eventos, hay que considerar definir ciertos límites, que gatillen el registro de estos fenómenos, junto con su duración y valores máximos (SAMCO, 2006).

Para determinar los efectos de las cargas, se pueden realizar las siguientes tareas:

- Monitoreo del efecto de cargas dinámicas y estáticas.
- Determinación de los efectos de cargas dinámicas.
- Clasificación de los efectos de cargas (análisis de esfuerzos permanentes).
- Determinación de esfuerzos extremos y la frecuencia de ocurrencia.

Tras la observación permanente, se pueden realizar las siguientes tareas:

- Evaluación de la vida restante.
- Evaluación de la seguridad estructural actual.
- Determinación de períodos de mantención.

El estado actual de la estructura se evalúa mediante:

- Mediciones de esfuerzos, deflexión, curvatura e inclinación en lugares determinados, que permiten conocer el estado del asentamiento en fundaciones y cambios globales de la rigidez, entre otros parámetros.
- Observación de frecuencias naturales de la estructura, que muestra cambios en la rigidez global.
- Monitoreo selectivo de cambios en los modos de vibrar.

Las mediciones de parámetros locales corresponden a:

- Evaluación de longitud y ancho de grietas.
- Observación de zonas estructurales con peligro de agrietamiento.
- Tensiones en puntos donde se concentran los esfuerzos.
- Deflexión estática y vibraciones que generan desplazamientos.
- Asentamientos de fundaciones.

2.3.8 Determinación de valores límites para estabilidad y servicio

Los valores límites para estabilidad y servicio se pueden obtener por desarrollos numéricos, a partir de datos experimentales, códigos, estándares y guías, como en el caso del estándar AASHTO (America Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO, 2017) o del Manual de Carreteras (MOP, 2012). Mayores detalles se presentan en la sección 6.9 referida a Definición de alarmas.

Estabilidad: La cual debe ser asegurada con el límite de estado último. Los cambios globales de posicionamiento por asentamiento e inclinación de fundaciones deben ser limitados por el estado límite de servicio, los cuales pueden obtenerse por modelos estructurales que deben considerar todas las condiciones de borde.

Servicio: los límites de deformación y vibración en servicio están regulados en códigos, estándares y guías, lo cual es importante para estructuras donde las deformaciones provocadas por las cargas afectan la serviciabilidad. A pesar de esto, los límites para deformación y comportamiento dinámico se pueden considerar discretos. Para asegurar la durabilidad es necesario limitar deformaciones, esfuerzos y daños tales como grietas.

Capítulo 3 Adquisición y Manejo de Datos

3.1 Selección de Sensores

Para monitorear la salud estructural de un puente, es necesario conocer su comportamiento mediante sensores. Existe una gran diversidad de sensores en el mercado actual para la aplicación en un sistema de monitoreo de puentes. A continuación, se presenta la Tabla 3-1 con las principales características de los sensores más utilizados en aplicaciones reales.

Tabla 3-1: Resumen sensores

Sensor	Acelerómetros	Fibras Ópticas	GPS	Sensor AE	Strain Gauges	Inclinómetros
Fenómeno a medir	Aceleración absoluta	Desplazamientos, localización de grietas, esfuerzos, inclinación, temperatura.	Desplazamientos	Emisiones acústicas	Esfuerzos	Inclinaciones
Monitoreo	Global/local	Global/Local	Global	Local	Global/Local	Global/Local
Instalación	Simple	Compleja	Simple	Compleja	Simple	Simple
Precisión	± 0.001 (g)	Deformaciones: ± 1.2 ($\mu\epsilon$), Aceleración 0.1 (g)	H: ± 5 (mm), V: ± 10 (mm)	± 1.5 (dB)	± 1.2 ($\mu\epsilon$)	0.005°
Alimentación	DC: 5 (V)	AC/DC	AC/DC	AC/DC	AC/DC	AC/DC
Rango de mediciones	$\pm 1.7, \pm 5, \pm 18$ (g)	Deformaciones: $\pm 2500\mu\epsilon$, Aceleraciones: $\pm 10g$	H: ± 3 (mm), V: ± 5 (mm)	-63/80 (dB)	± 1.2 ($\mu\epsilon$)	$\pm 3^\circ$
Limitaciones	Mediciones menores a 0.2 (Hz)	Análisis de datos complejo	Frecuencias menores a 20 (Hz)	Sensible a ruido ambiental	Sensible a cambios de temperatura ambiental	
Requisitos técnicos	Sin requisitos	Requerimiento de multi-plexer	Base de Radio externa	Utilización de varios sensores para identificar fallas	Sin requisitos	Sin requisitos

3.1.1 Acelerómetros.

Los acelerómetros corresponden a instrumentos que permiten determinar la aceleración que experimentan puntos específicos de las estructuras, debido a vibraciones generadas por cargas

dinámicas. Es necesario considerar que la señal de los acelerómetros es dependiente de cada instrumento, pero todos estos típicamente presentan inconvenientes para registrar vibraciones con frecuencias menores a 0.2 Hz, presentando dificultades para determinar aceleraciones en puentes de grandes luces (Meng, et al., 2007). Los acelerómetros se usan para detectar vibraciones de alta frecuencia generadas por cargas dinámicas tales como tráfico o viento (Meng, et al., 2007), en especial, presentan un mejor funcionamiento con las mediciones que tienen frecuencias mayores a 20 Hz.

Los acelerómetros se utilizan a la vez en el análisis global de monitoreo estructural donde se realiza una evaluación junto con métodos de procesamiento de señales (análisis de Fourier, filtros, transformada de Wavelet, entre otros), para conocer si la estructura presenta o no daños (Lych & Loh, 2006). Este es el método convencional para estudios dinámicos o monitoreo de estructuras de gran escala.

Uno de los acelerómetros más utilizados en SHM corresponden a los acelerómetros capacitivos o MEMS (Micro Electro Mechanical System), los cuales son desarrollados utilizando técnicas de fabricación microelectrónicas que, debido a su bajo costo y su rango de frecuencias altas, se han presentado como uno de los instrumentos más utilizados en SHM para determinar parámetros físicos como aceleración (Ahlborn, 2010). El funcionamiento de los acelerómetros MEMS, como se puede observar en la imagen 3-1, se basa en que la medición de aceleración puede realizarse midiendo la fuerza necesaria para acelerar un objeto de masa conocida, donde al conocer su desplazamiento y la fuerza que se le aplica al instrumento, se puede conocer la aceleración del objeto vibrante (Gomez, 2010).

Un sensor capacitivo, como se muestra en la imagen 3-1, provee un voltaje de salida que depende de la distancia entre dos superficies planas. Una de las placas es cargada con carga eléctrica. De esta forma, al cambiar la distancia entre las placas, la capacidad eléctrica del sistema cambia, el cual puede ser medido como un cambio en el voltaje. Los acelerómetros capacitivos proveen un alto grado de precisión y estabilidad, siendo menos susceptible a ruido o variaciones de temperatura. En general, poseen un ancho de banda adecuado (para aplicaciones sísmicas).

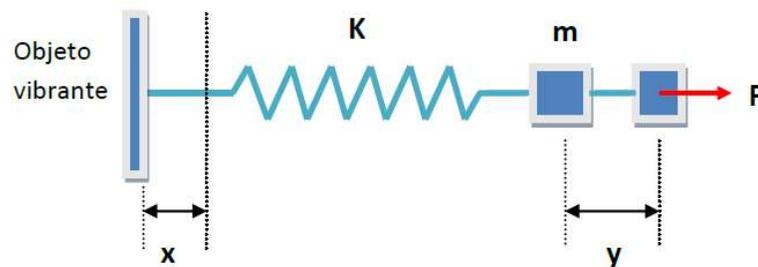


Ilustración 3-1: Modelo teórico de acelerómetro MEMS (Gomez, 2010).

Algunos modelos utilizados en SHM corresponden al acelerómetro capacitivo Episensor (ES-U2) desarrollado por Kinematics, que corresponde a un sensor uniaxial diseñado primordialmente para la aplicación en estructuras ingenieriles, capaz de medir hasta $\pm 4g$ y hasta un mínimo del ruido

ambiental, con rangos de $\pm 0.25g$ hasta $\pm 4g$, con una precisión de $0.001g$ (https://kinemetrics.com/post_products/episensor-es-u2/).



Ilustración 3-2: Ejemplo de Acelerómetro

Otro modelo de acelerómetros corresponde a un acelerómetro triaxial MEMS con una tarjeta inalámbrica emisora de datos, correspondiente al modelo MMA7456L de “NPX Semiconductors”, de baja potencia que incluye un filtro pasa-bajos, compensación de temperatura y diferentes sensibilidades ($\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$). La tesis de (Gomez, 2010), valida la utilización de estos acelerómetros para la medición fiable de las aceleraciones de una estructura.

Para mejorar el rango de los acelerómetros, en especial con frecuencias bajas, se puede conectar un acelerómetro con un instrumento GPS, los cuales presentan mejores mediciones en frecuencias menores a 0.2 Hz, en comparación con los acelerómetros. Para evitar el movimiento relativo de ambos instrumentos y para reducir la complejidad del análisis de datos, ambos sensores deben estar conectados uno al otro (Roberts, et al., 2001).

Entre las consideraciones para elegir el tipo de acelerómetro a incorporar dentro del sistema de monitoreo es necesario que el rango dinámico del acelerómetro sea mayor al rango de amplitud de vibraciones esperado de la estructura, mientras que el rango de frecuencias del instrumento debe ajustarse al rango de frecuencia esperado. Finalmente, se recomienda utilizar acelerómetros de baja sensibilidad para vibraciones de alta amplitud, mientras que para vibraciones de baja amplitud se recomiendan acelerómetros de alta sensibilidad.

3.1.2 Fibra óptica

Estos instrumentos corresponden a una hebra delgada de material dieléctrico que es capaz de conducir y transmitir impulsos luminosos de un extremo al otro, los cuales son insensibles a interferencias electromagnéticas, son livianos, flexibles, libres de corrosión, permiten realizar un monitoreo continuo y presentan una baja pérdida de transmisión (Casas & Cruz, 2003).

Una de las propiedades que permite que las fibras ópticas sean ideales para SHM es que la intensidad de la luz de la señal óptica disminuye cuando la fibra es tensada perpendicularmente a su largo, donde la intensidad de la luz puede aumentar o disminuir si la fibra se comprime o estira, permitiendo ser un indicador de esfuerzos o desplazamientos (Casas & Cruz, 2003). Para determinar el esfuerzo que experimenta la fibra óptica, la señal forzada se compara con una señal no forzada con la misma temperatura.

Una fibra óptica está compuesta por tres elementos principales: el núcleo, el revestimiento y la capa protectora. El revestimiento refleja la onda de luz de regreso al núcleo, asegurando la transmisión de la luz en el núcleo. Esta acción es posible debido a un índice refractivo más alto en el núcleo con relación al revestimiento, lo que provoca una total reflexión interna de luz. La capa protectora sirve para proteger la fibra de condiciones externas y daños físicos (National Instruments, 2010).

3.1.2.1 Tipos de Fibras ópticas

1) OTDR: “Optical Time-Domain Reflectometry”

La técnica “Optical Time-Domain Reflectometry” (OTDR), permite determinar desplazamientos a lo largo de la estructura, mediante el cambio en la longitud de la fibra el cual se mide a través de los cambios de la intensidad del haz de luz y su tiempo de viaje, la cual, a la vez, obtiene propiedades intrínsecas de las fibras ópticas, tales como la intensidad, frecuencia y polarización (Casas & Cruz, 2003).

Las fibras OTDR se pueden utilizar para la detección y localización de grietas. Para esto se adhiere la fibra a la estructura con un cierto ángulo de inclinación respecto a la dirección en la que se espera la formación de grietas (es necesario estimar la dirección de las grietas). Al abrirse la grieta, esta forzaría a la fibra a flexionarse, lo que provocará pérdidas en la potencia de la luz y gracias al uso de OTDR se pueden localizar las grietas basándose en el tiempo en que ocurre la pérdida de potencia (PITRA, 2013).

Una de las técnicas utilizadas para aumentar el rango de las fibras OTDR, es la aplicación de la dispersión de Brillouin, definiendo la técnica BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometry), que además presenta la ventaja de poder monitorear la estructura a lo largo de todo el sensor (distribuido). Esta técnica permite medir temperatura y esfuerzos a lo largo de la estructura, pero solo permite medir una distancia de un metro, por lo cual solo sirve para un monitoreo local (Barrias, et al., 2016).

2) FBG: Fibras Bragg Grating

Estas fibras corresponden a uno de los sensores ópticos más versátiles y utilizados dentro del monitoreo estructural (Navarro, 2014). Estos sensores utilizan las rejillas de Bragg (Bragg Grating) como un filtro selectivo de longitud de onda de luz, que refleja solo aquella parte del espectro de luz que satisface las condiciones entregadas.

Un sistema de sensores de fibra óptica FBG se compone de al menos (Micron Optics, Inc, 2012):

- Fuente y detector de luz.
- Sensores de fibra óptica FBG.
- Fibra óptica y accesorios para la interconexión de la fibra.

El principio del funcionamiento del sistema óptico consiste en que los elementos sensores de fibra óptica FBG modulan algún parámetro de la señal enviada desde la fuente de luz (intensidad, longitud de onda, polarización), lo cual da lugar a un cambio en las características de la señal óptica recibida en el detector de luz. La fuente y el detector de luz del sistema se incorporan en un equipo denominado Interrogador Óptico. El interrogador óptico más común corresponde a Multiplexación por División de Longitud de onda (WDM, siglas en inglés de Wavelength Division Multiplexing), ya que presenta un mayor alcance, una mayor capacidad de sensores y la posibilidad de interrogar simultáneamente múltiples fibras. En la imagen 3-3 (Navarro, 2014) se puede observar un ejemplo de interrogador óptico (multiplexer) (<http://www.micronoptics.com/product/optical-sensing-instrument-si155/>). Junto con este interrogador se suelen incluir un Multiplexer, instrumento que transmite la señal emitida desde el interrogador a varios sensores ópticos (Xiao, et al., 2017).



Ilustración 3-3: Ejemplo de Multiplexer, Fuente: <http://www.micronoptics.com/product/optical-sensing-instrument-si155/>

Estas fibras FBG son usadas para determinar micro deformaciones o también como sensores espectrométricos, los cuales obtienen medidas absolutas de cambios en la frecuencia de la señal óptica para evaluar esfuerzos mecánicos y térmicos de la fibra. Las fibras FBG permiten el análisis de múltiples parámetros a lo largo de una estructura en tiempo real, al utilizar la técnica llamada “multiplexing” que corresponde a colocar varias rejillas de Bragg a lo largo de la fibra (Chan, et al., 2006). Ejemplos de aplicación se pueden encontrar en <http://www.micronoptics.com/product/fiber-bragg-grating-os1100/>.

Las FBG son sensibles a la temperatura y esfuerzos y deben ser separados de los cambios en las propiedades ópticas de las fibras. Las FBG también pueden ser utilizadas como Inclinómetros, ya

que ofrecen mayor precisión que otras técnicas y poseen la capacidad de medir en diferentes puntos a la vez (multiplexing). La temperatura y esfuerzos se compensan mediante una segunda fibra, entonces, al saber que los cambios que ocurren de igual manera en ambas fibras se considerarán como cambios por temperatura y pueden ser ignorados, mientras que los cambios diferidos entre ambas fibras serían un indicador de la inclinación del cable (Casas & Cruz, 2003)

Las FBG que miden inclinaciones detectan la rotación y deflexión de la estructura y también pueden determinar las propiedades dinámicas mediante el procesamiento de la señal (por ejemplo, el instrumento FBG-TI-310 inclinómetro, http://www.fbg.co.kr/eng/bbs/board.php?bo_table=fbgp04&wr_id=1). Estos sensores presentan una alta precisión, permitiendo medir continuamente y a largo plazo, un sistema de compensación de temperatura y un rango de 8, 5 o 3 grados dependiente del uso. Gracias a un análisis de la FFT (Fast Fourier Transform) de la señal de vibraciones de la estructura, se pueden obtener las principales frecuencias naturales de las estructuras (Xiao, et al., 2017).

En el mercado se pueden encontrar actualmente diferentes fibras, a saber:

Las fibras de Micron Optics Inc. tales como Os 3155 permiten medir esfuerzos dentro de la estructura, el Os 5100 que mide desplazamientos y el Os 7100 que mide aceleraciones en uno, dos o tres ejes dependiendo de su configuración. Las frecuencias de las aceleraciones pueden variar desde 0 a 300 Hz, lo que permite realizar un monitoreo dinámico de la estructura (Navarro, 2014).

Otro método de uso de las fibras ópticas es como sensores interferométricos, que sirven para medir variaciones de esfuerzos y temperatura. Este sistema corresponde a dos fibras, donde una sirve como referencia para la comparación con la otra fibra (Barrias, et al., 2016).

Las ventajas de los sensores de fibra óptica es que son ideales para SHM de estructuras de hormigón armado debido a que son estables, con una sensibilidad adecuada (hasta $2\mu\text{m}$), son sensibles a la dirección del cambio paramétrico, insensibles a perturbaciones electromagnéticas, capaces de medir varios puntos a la vez y duraderos. Dentro de los diferentes tipos, los FBG son los que presentan una mayor ventaja ya que entregan una respuesta lineal y no requieren de calibración (Chan, et al., 2006), y una de sus principales desventajas sería el costo de operación.

3.1.3 GPS

El sistema GPS (Global Positioning System) permite conocer los desplazamientos absolutos de la estructura. Este sistema se compone de 3 partes: los satélites que orbitan la Tierra, estaciones de control y monitoreo, y el receptor de señal GPS de cada usuario. Se utiliza el concepto de triangulación para determinar la ubicación del GPS, para lo cual es necesario conocer la ubicación de los satélites. Estos satélites transmiten continuamente su posición (x_i, y_i, z_i) . La distancia entre el satélite y el receptor se calcula en base al tiempo de viaje de la señal electromagnética desde el satélite hasta el receptor, y al conocer la distancia entre el receptor y por lo menos 4 satélites, se puede determinar la ubicación del receptor en la Tierra (Romero, et al., 2012).

Existen técnicas estáticas, cuasi-estáticas y cinemáticas en tiempo real (RTK Real-Time Kinematic), en donde la última se ha desarrollado en el ámbito de SHM. Para esta técnica, se agrega

una estación de referencia, que calcula la diferencia entre su posición, previamente obtenida, y la posición obtenida por el sistema de satélites. Las diferencias detectadas se indican como errores, los cuales son enviados al receptor para mejorar su precisión (Yi, et al., 2010).

La precisión de los sistemas GPS para movimientos dinámicos depende de varios factores como la razón de muestreo, el rango de cobertura de los satélites, el efecto atmosférico y los métodos de procesamiento del GPS. Se ha demostrado que la habilidad de los sistemas GPS para el análisis de señales con una frecuencia menor a 2 Hz y amplitudes mayores a 2 cm son lo suficientemente precisas para ser incluidas dentro de los estudios de SHM (Meng, 2002).

Dentro de las ventajas de este sistema se podría mencionar que (Yi, et al., 2010):

- El receptor de la señal GPS funciona continuamente frente a cualquier clima.
- Precisión de 5 mm en el plano horizontal y 10 mm en el eje vertical (Gomez, 2010).
- Tiempo de respuesta de alta precisión de 0.05 s.

Estudios han demostrado que se pueden obtener las propiedades dinámicas de puentes, como frecuencias naturales y formas modales, mediante la aplicación de sistemas de GPS RTK y métodos de análisis de la señal como la transformada de Wavelet y el algoritmo ERA (Eigensystem realisation algorithm, descrito en Meo et al. (2006). También se comprobó que el sistema GPS es una forma apropiada para monitorear grandes deflexiones en estructuras con bajas frecuencias de vibración (Romero, et al., 2012). Es necesario mencionar que los GPS dinámicos presentan un costo de adquisición alto, y se presentan diferentes métodos de funcionamiento de los instrumentos en Kaloop et al. (2017).

Resultados experimentales han demostrado la eficiencia de los sensores GPS para medir desplazamientos por deformaciones térmicas, movimientos de corto y largo plazo y asentamientos de las fundaciones de estructuras civiles con una resolución de 5 mm para GPS estáticos y 10 mm para GPS dinámicos (Meng, 2002).

Como principal desventaja del sistema, se puede mencionar que las medidas obtenidas por los sistemas de GPS son afectadas por Multipath (método utilizado para transmisión de información entre sensores y satélites), el cual es la principal fuente de errores de las mediciones del sistema, y por ende, las limitaciones del GPS.

Al implementar un sistema integrado de un receptor GPS con un acelerómetro, las frecuencias medidas pueden llegar hasta los 100 Hz, haciendo el sistema de medición más flexible (Meng, 2002).

Para el estudio de la deformación de un puente, se suele aplicar el sistema GPS RTK, el cual requiere de dos sensores, uno cumple la función de base (referencia) y el otro de Rover (móvil). Como ejemplos de instrumentos utilizados en el monitoreo estructural, se destacan las marcas “Leica geosystem”, “TOPCON” y “Trimble” con modelos como Topcon GR-3, Trimble 4800, Trimble R8 GNSS o Leica GS18 T. (<https://leica-geosystems.com/es-cl/products/gnss-systems/smart-antennas/leica-gs18-t>; <http://pdf.directindustry.es/pdf-en/topcon/gr-3/22494-445425.html#open>) (Romero, et al., 2012). En la Ilustración 3-4, se observa un ejemplo de un sensor GPS con tecnología MEMS.

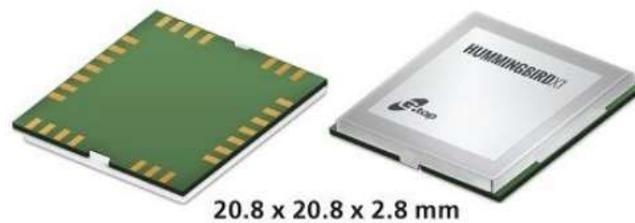


Ilustración 3-4: Sensor GPS MEMS

Fuente: <https://convertronic.net/semiconductores/>

Debido a que los sistemas GPS dependen directamente de los satélites, existen softwares computacionales que permiten identificar el momento en donde la posición de los satélites es la que más favorece las mediciones (Mission Planning, por ejemplo) (Romero, et al., 2012).

Para el análisis de los datos GNSS (Global Navigation Satellite System), al cual pertenecen los datos GPS, existen diferentes softwares comerciales que procesan la información obtenida por los sensores, cómo por ejemplo, “Leica Office”, “Topcon Tools”, “Ashtech Solutions” y “TGO” (Romero, et al., 2012).

3.1.4 Sensores de Emisiones Acústicas

Los sensores de emisiones acústicas se basan en la detección de pequeñas ráfagas de energía llamadas emisiones acústicas. Esta liberación de energía causa ondas de sonido que se transmiten a lo largo de la estructura que pueden ser detectados por sensores piezoeléctricos, colocados estratégicamente en la estructura, llamados sensores receptores acústicos. Los sensores convierten las ondas de sonido en una señal eléctrica, para luego procesar la señal. El procesamiento adecuado de una o más señales permite la detección de daño y su localización (Yapar, et al., 2015). En general, la señal es afectada por las características de la fuente de las emisiones acústicas, el camino recorrido por la señal desde la fuente al sensor (material de la estructura) y las características del sensor (Noorsuhada, 2016).

La adquisición de datos de los sensores de emisiones acústicas suele estar basada en límites, en donde al momento en que el nivel de decibeles de la señal de llegada supera el límite previamente definido, se graba la información del sensor. Esto es debido a la alta cantidad de información que recolectan los sensores de EA (Saboonchi, et al., 2016). La definición de límites también sirve para filtrar ruido ambiental en la señal (Noorsuhada, 2016). Se suele usar límites de 60 dB para activar la grabación de la data obtenida por el sensor (Worley, et al., 2019).

Para poder determinar las características de la fuente de AE, es necesario que el sensor detecte los siguientes parámetros: amplitud, duración de la señal, energía, frecuencia, la cantidad de veces que se supera el límite definido, y el tiempo entre la primera vez que se supera el límite con la amplitud máxima alcanzada. Dentro de los parámetros más relevantes de las emisiones acústicas se puede

mencionar la amplitud de la señal, correspondiente a uno de los elementos más importantes para caracterizar la señal, y la duración de la señal que sirve para caracterizar el surgimiento de grietas y su crecimiento (Noorsuhada, 2016).

Para detectar las fallas, se requiere de un conjunto de sensores que detecten la señal y determinen el tiempo de viaje de la señal, para que esta pueda ser triangulada al origen de la señal, como se observa en la Ilustración 3-6.

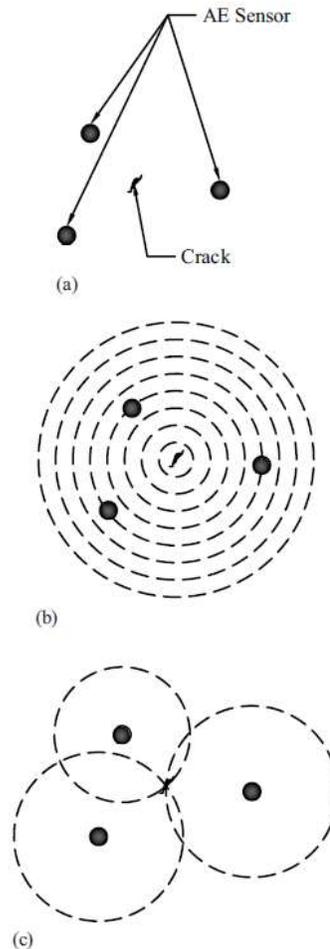


Ilustración 3-5: Triangulación de señal AE: (a) Formación de grieta, (b) Emisión de AE, y (c) Localización de fuente mediante triangulación (Worley, et al., 2019)

Es necesario mencionar que los sensores AE corresponden a sensores útiles para un sistema de monitoreo local, lo que a la vez les permite detectar daño antes que otros métodos de monitoreo e inspección visual (Sabounchi, et al., 2016). Para la detección de fallas locales, como la formación y crecimiento de grietas, se requiere de sensores AE altamente sensibles, y uno de los principales desafíos corresponde a la influencia del ruido ambiental en las señales, el cual puede interferir la señal proveniente de la falla y evitar que los sensores puedan detectarlas (Sabounchi, et al., 2016). Los sensores AE también son capaces de detectar y evaluar fallas en las barras pretensadas en puentes de hormigón, según (Yuyama, et al., 2006).

Para el monitoreo estructural, se pueden utilizar sensores AE piezofilm o MEMS, donde los sensores piezofilm pueden detectar mayores amplitudes y más rápido, pero son más sensibles al ruido ambiental, lo que hace que los sensores MEMS puedan detectar el origen y crecimiento de grietas de mejor manera. Otra diferencia relevante corresponde al tamaño de los sensores, como se observa en la ilustración 3-6 que se presenta a continuación. En la imagen de la izquierda, se presenta un sensor piezofilm de dimensiones 2x2x2 cm, mientras que a la derecha, se muestra un sensor MEMS de 1x1x0.5 cm el cual contiene 4 sensores AE, 8 sensores de esfuerzos y acelerómetros dentro de la placa MEMS (Saboonchi, et al., 2016).

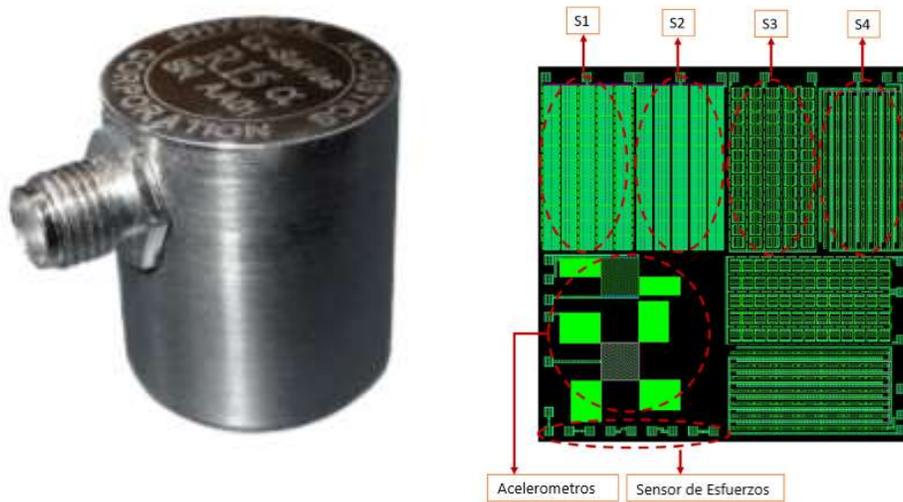


Ilustración 3-4: Comparación sensores AE: Piezofilm y MEMS (Yapar, et al., 2015)

Como uno de los sensores piezofilm utilizados en el mercado para detectar información de emisiones acústicas, se pueden mencionar el Modelo MISTRAS R15- α de “Physical Acoustics”, junto con el sistema de adquisición de datos MISTRAS 1283 USB AE (Yapar, et al., 2015) (<https://www.physicalacoustics.com/by-product/sensors/R15a-150-kHz-General-Purpose-AE-Sensor>).

3.1.5 Galgas extensiométricas (Strain Gauges)

El sensor utilizado para el registro de las deformaciones recibe el nombre de Galga extensiométrica, la cual está compuesta principalmente por un filamento de un material conductor, que permite conocer la deformación experimentada por el elemento al cual se encuentra adherido. Las galgas suelen colocarse en la superficie de los componentes estructurales, presentando cambios en su largo al momento en que estos componentes se deformen (Dong, et al., 2010). Las galgas extensiométricas se basan en el principio que, ante un esfuerzo de tracción o compresión, el área transversal del filamento será minorada o mayorada produciendo una variación en su resistencia eléctrica, siendo posible relacionar el cambio de la resistencia con la variación en su longitud (Catteneo, 2009).

La manera más adecuada para determinar el efecto de cargas vivas en una estructura es medir las deformaciones en elementos críticos previamente determinados y aplicar procedimientos para

evaluar la vida restante de los elementos estructurales, como los mencionados por guías norteamericanas (American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO, 2003).

Como consideración, es necesario mencionar que los sensores utilizan filamentos para disminuir los efectos de expansión térmica, pero resulta imposible eliminar por completo estos efectos, por lo que es necesario prestar atención a las condiciones a las cuales se verá expuesto el sensor.

El uso de strain gauges permite obtener deformaciones del orden del microstrain ($\mu\epsilon = \epsilon \cdot 10^6$). Este nivel de deformaciones, que corresponde a una variación mínima en la resistencia del sensor, resulta imposible de medir directamente, por lo tanto, se requiere de un sistema que garantice la correcta adquisición de datos, como un óhmetro digital (Catteneo, 2009).

Como ejemplo, se puede mencionar el strain gauge Tokyo Sokki Kenkyujo, modelo PFL-20-11 o cualquier otro instrumento de la serie P, los cuales sirven para determinar esfuerzos en elementos de hormigón reforzado (https://tml.jp/e/product/strain_gauge/concrete.html). El modelo, presentado en la ilustración 3-7, mencionado puede funcionar en temperaturas de -20° a 80°C , y con una resistencia 102Ω (Catteneo, 2009).

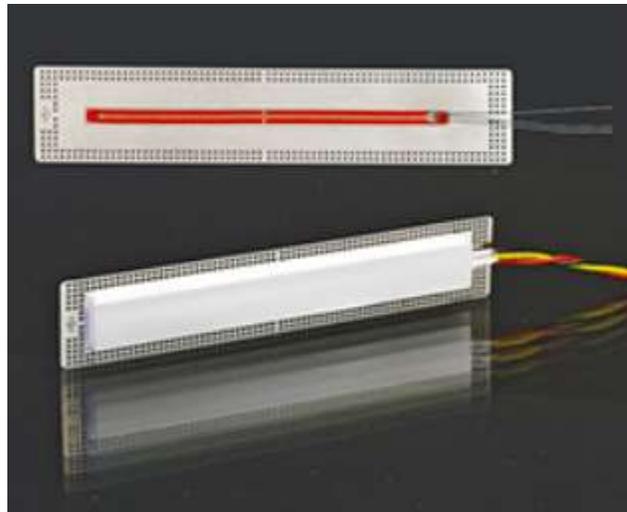


Ilustración 3-5: Galga extensiométrica para concreto. Fuente: https://tml.jp/e/product/strain_gauge/concrete.html

3.1.6. Inclínómetros

Los sensores inclinómetros están compuestos por dos cúpulas herméticamente cerradas separadas aproximadamente $1/8''$. En la cúpula inferior de poliéster se encuentran 4 placas capacitivas mientras que la cúpula superior es de aluminio. Un líquido con alta constante dieléctrica se sella

dentro de la cúpula dejando una burbuja de aire, la cual está centrada a nivel de posición y se mueve de un lado a otro cuando el dispositivo se inclina (Serna, 2011).

Los inclinómetros permiten monitorear los movimientos y rotaciones estructurales de hasta 0.005° (Meng & Ansari, 2013) y un rango de $\pm 3^\circ$, permitiendo medir las deflexiones de un puente bajo condiciones de tráfico normales. Como ventaja, se puede mencionar que los inclinómetros son altamente sensibles, confiables, de menor costo y fácil instalación. En la literatura se pueden encontrar métodos para calcular los desplazamientos verticales de una estructura mediante las medidas obtenidas por inclinómetros (Zhang, et al., 2017). La tecnología MEMS también se ve presente en los inclinómetros, permitiendo utilizar sensores de menor tamaño y con una menor demanda de energía, donde un inclinómetro puede funcionar hasta 1.5 años con baterías de 3.6 V (Hoult, et al., 2010).

En la Ilustración 3-9 se observa un inclinómetro MEMS de dos ejes que entrega valores análogos que son convertidos por un convertidor ADC dentro del mismo sensor. El sensor consiste en dos inclinómetros con sentidos perpendiculares y un módulo de procesamiento para convertir y transferir la data, con un diámetro final de 50 mm y 78 mm de alto. El desarrollo del sensor se encuentra en (Woong, et al., 2013).



Ilustración 3-8: Inclinómetro MEMS (Woong, et al., 2013)

3.2 Posicionamiento óptimo de sensores

El posicionamiento óptimo de sensores (OSP por sus siglas en inglés) es uno de los puntos relevantes a considerar al momento del monitoreo vibratorio de una estructura, donde existen diferentes métodos que son utilizados para estimar los parámetros modales basados en la respuesta vibratoria de la estructura. Las técnicas de OPS pueden ser utilizadas eficientemente para la implementación de un SHM práctico, al eliminar data redundante de sensores, eliminando el número de sensores requeridos o al enfatizar cual información requiere más atención en el análisis (BinBin, et al., 2011).

Para optimizar el uso de técnicas OPS, se deben identificar el mínimo de sensores requeridos para caracterizar las formas modales deseadas. El objetivo de esta optimización es minimizar la cantidad de sensores y localizarlos adecuadamente, lo que se estima útil al generar una menor cantidad de data, pero asegurando su calidad al momento de describir las formas modales de la estructura y disminuyendo el costo de instalación y mantenimiento de los sensores (Chang & Pakzad, 2014).

Las técnicas de OPS se pueden considerar como un problema de combinatoria que puede ser generalizado como “dado una cierta cantidad n de puntos candidatos, encontrar m ubicaciones, donde $m < n$, los cuales puedan generar el mejor desempeño para monitorear la estructura” (Ti & Li, 2012). Existen diferentes técnicas de OSP, las cuales se describen a continuación (BinBin, et al., 2011), (Chan, et al., 2006):

- Método EI: El método EI (Effective Influence) es uno de los métodos más utilizados en técnicas de ensayos dinámicos y actualización de modelos estructurales, junto con el posicionamiento adecuado de n sensores en una estructura. El método se basa en determinar un índice de EI para cada posición de los sensores, el cual representa la contribución respectiva de cada sensor para la identificación de las formas modales.
- Método EI-DPR: El coeficiente DPR (driving point residue) se incorporó al método EI para evitar la selección de ubicación de sensores donde se presenta una baja energía, la cual corresponde a uno de los limitantes del método previo.
- Método KE: El método KE (kinetic energy) es un método similar a EI, pero considera la masa del sistema para el análisis.

3.3 Sistema de Adquisición de Datos

3.3.1 Uso y análisis de datos.

Visualizar y analizar la información es clave en la toma de decisiones oportunas y acertadas, o bien, para ampliar los conocimientos específicos del estado actual de la estructura.

Las medidas de procesos lentos (socavaciones, inclinaciones y agrietamientos, por ejemplo) son registrados discreta o continuamente, donde se describen mediante parámetros estadísticos como valores máximos, promedios y varianzas, los cuales son almacenados con el tiempo correspondiente. Los procesos rápidos, tales como tráfico, viento, olas e impactos, por ejemplo, son medidos constantemente para registrar el desarrollo de la respuesta estructural.

3.3.2 Modelos de carga.

Estos representan un filtro para reproducir los efectos reales de las cargas sobre la estructura, describiendo las fuerzas requeridas para que los efectos en el modelo estructural correspondan a los registrados para las cargas reales. Si los modelos se actualizan constantemente, permiten ajustar los niveles de seguridad a los respectivos efectos. Para calibrar estos modelos, se requiere un

monitoreo de las cargas, que entregue una base estadística y permita calcular las cargas aplicadas a la estructura.

3.3.3 Equipos de acondicionamiento de señales

Corresponden a amplificadores de señal, filtros análogos (que eliminan ruido), sistema de adquisición de datos con convertidor análogo-digital, análisis computacional para administrar, procesar, almacenar y reducir los datos, almacenamiento de data, fuente de poder ininterrumpida y telecomunicación.

3.3.4 Medidas estáticas

La medición de desplazamientos tales como deflexión, inclinación, asentamiento, deformación, agrietamiento y efectos ambientales, se puede efectuar mediante promedios de horas junto con su desviación estándar.

3.3.5 Medidas Dinámicas

Los cambios en el comportamiento de la capacidad de carga de una estructura suelen estar asociados con las características de vibración. Estos cambios en el sistema estático afectan la frecuencia natural y los modos de vibrar, los cuales se pueden determinar con un monitoreo a largo plazo.

3.3.6 Sistema de adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos corresponde al proceso de obtención de la información obtenida por los sensores tras la instrumentación de las estructuras. Esta información es recolectada, procesada y transmitida para un análisis profundo e interpretación. Los sensores pueden generar señales análogas o digitales, que representan las variables que están siendo monitoreadas. Estas señales deben ser transmitidas de manera digital para que puedan ser procesadas por un computador. En otras palabras, el sistema de adquisición de datos es un intermediario que facilita el flujo de información desde los sensores al computador (Emin, et al., 2003). Existen fabricantes que se especializan en DAQ (Data Acquisition), entre las que se encuentran: Analog Devices Inc., Daytronic Corporation, Digitexx Data System, Inc., Frequency Devices, Inc., IMC DataWorks, LLC y Texas Measurements, Inc., entre otros.

Los sistemas de adquisición de datos presentan desafíos en el monitoreo estructural, como el sistema de alimentación de poder, las redes inalámbricas o ancho de banda de comunicación, que pueden complicar el manejo de grandes cantidades de datos. Es por esto, que se han desarrollado

dos técnicas para los sistemas de adquisición de datos: el “data logging” y “decentralized data aggregation” (Linderman, et al., 2013).

En “data logger” se utilizan instrumentos que demodulan la señal de varios sensores, recolectan la información, la condicionan y la almacenan. En este proceso, la data es adquirida localmente por los nodos en los sensores, para luego enviarla individualmente a la estación base, donde se puede analizar junto con el historial de tiempo de cada medida. Este método utiliza de mejor manera la transmisión de banda ancha, pero el tiempo de procesamiento puede ser significativamente mayor.

El segundo método corresponde a una adquisición de data en tiempo real. La data de cada sensor se adquiere y es procesada localmente, en nodos encargados de un vecindario de sensores a diferencia del data logger que es individual para cada sensor, para luego reenviar la información procesada a un nodo de salida. Este método reduce la demanda de poder al disminuir el tamaño de información transmitida, pero no permite un historial completo de tiempo. Este sistema permite acceder a la data entre los intervalos de muestreo, mientras que otros métodos presentan un retraso debido a que deben terminar todos los intervalos antes que la información esté disponible (Linderman, et al., 2013).

3.3.6.1 Arquitectura del sistema

El modelo típico de un sistema de adquisición de datos realiza mediciones sobre el medio, transforma la información de análogo a digital en el propio nodo, para luego transmitirla a una estación base, donde la información puede ser almacenada temporalmente y tratada para acabar finalmente en un servidor base que permita un análisis profundo de los datos.

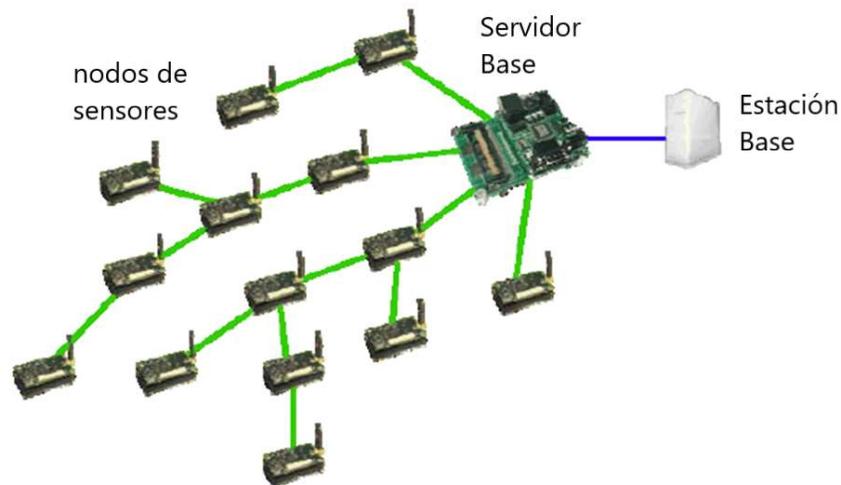


Ilustración 3-9: Red inalámbrica de sensores (Rodríguez, et al., 2016).

Como mínimo, el sistema de adquisición de datos debe incorporar nodos de sensores, ya sea conectados o inalámbricos, una base de adquisición de datos, que corresponde a la estación base y

finalmente una unidad de procesamiento y monitoreo. Los módulos deben ser capaces de recopilar la información de los sensores y transmitirla a los controladores de adquisición de datos (para conexiones inalámbricas considerar el protocolo ZigBee (Noel, et al., 2017)). Estos controladores son los responsables de coordinar la comunicación de los nodos, de manejar, almacenar y analizar la data obtenida, para luego decidir la información a enviar, mediante conexión telefónica o vía internet. La cantidad de nodos del sistema dependerá de cada aplicación (Noel, et al., 2017).

Las redes de sensores están formadas por un conjunto de dispositivos pequeños denominados nodos sensores, con la capacidad limitada de cómputo y comunicación, cuyo tiempo de vida depende de una batería adjunta al dispositivo. Estos nodos se encuentran dispersos a lo largo de la estructura, de manera estratégica para su monitorización (Rodríguez, et al., 2016). Como sistema operativo de los nodos sensores, se pueden utilizar TinyOS para procesar toda la información relacionada con recolección de data, sincronización y transferencia de la información (Noel, et al., 2017).

Cabe mencionar que para implementar un sistema de SHM se debe tener una fuente de energía a largo plazo por cuanto se requiere de una conexión directa con el sistema eléctrico (reforzado por baterías y UPH en cortes de luz) y/o ser alimentados por fuentes de energía instaladas en la estructura o sus cercanías como lo son los paneles solares o sistemas eólicos.

3.3.6.2 Red de Sensores Inalámbricos

Debido al desarrollo de la tecnología, se ha progresado en la creación de nodos de sensores inalámbricos, los cuales presentan ventajas sobre los sistemas conectados al facilitar su instalación y manejo, pero presentan una menor capacidad de banda ancha, por lo cual, para posibilitar la adquisición de datos se limita el tamaño de la señal, la cantidad de canales y/o la frecuencia de muestreo. En la bibliografía se muestran procedimientos donde estas limitaciones permiten una transmisión continua y en tiempo real de la data de sensores inalámbricos de hasta 40 canales de 12-bit de data en 20 nodos con una frecuencia de muestreo de 128 Hz (Niu, et al., 2009), (Whelan & Janoyan, 2009).

Debido a su alto costo de instalación, las redes de sensores conectadas por cable suelen ser aplicables a monitoreos a largo plazo (Noel, et al., 2017). De acuerdo con lo mencionado en (Lych & Loh, 2006), los sensores inteligentes con una comunicación inalámbrica son capaces de reducir los esfuerzos de instalación y aumentar el número de sensores, ya que no se requiere de cables para la transferencia de datos, el mantenimiento del sistema es menor, el procesamiento e interpretación de los datos puede ser distribuido a lo largo de los nodos de la red y el sistema permite fallas locales sin necesariamente afectar a otros. En la tabla 3-2, se comparan las redes conectadas con las redes inalámbricas.

Tabla 3-2: Comparación de red sensores conectada e inalámbrica (Noel, et al., 2017).

Variable	Red conectada de sensores	Red inalámbrica de sensores
Costos	Alto, hasta \$25,000 (USD)	Bajo, aproximadamente \$500 (USD) por sensor
Tiempo de instalación	Alto, hasta 9 días	Bajo, media hora por sensor

Vida útil	Limitada por vida útil de hardware	Limitada por duración de baterías y demanda de sensores
Banda ancha	Gran banda ancha debido a la conexión por cable	Conexión limitada

Uno de los aspectos que requieren mayor atención con los instrumentos inalámbricos corresponde a la fuente de energía necesaria para un monitoreo a largo plazo, ya que la capacidad de las baterías es limitada y recargarlas termina resultando engorroso y de tiempo demandante. Los principales consumidores de energía corresponden al radio, los sensores con acondicionamiento de la señal y los microcontroladores (Meyer & Motavall, 2010). Existen nodos de sensores inalámbricos de bajo consumo, que conectados a 2 pilas AA son capaces de registrar el comportamiento de la estructura por hasta 1 año 9 meses (Humair, et al., 2018). Junto con esto, se puede generar una eficiencia de la energía disponible mediante la optimización de la señal de transmisión, la reducción de data en los nodos, ruteo eficiente y recarga de baterías (Noel, et al., 2017).

La tecnología de red inalámbrica más común corresponde a la familia de estándares IEEE 802.11 (IEEE, 2009), ratificada en 1997 por el instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE), la cual utiliza diferentes bandas de frecuencia, como la banda 2.4 GHz que es utilizada por IEEE 802.11b, o bandas de 5GHz, utilizada por IEEE 802.11, las cuales se utilizan cuando la demanda de ancho de banda es alto en un sistema inalámbrico (Ruiz & Garita, 2019).

3.3.6.3 Tecnologías de transmisión de datos

Para la transferencia de los datos obtenidos por el sistema y teniendo en cuenta el despliegue del sistema de monitoreo, se considera la evaluación de tecnologías inalámbricas dado a que son menos intrusivas, más fáciles de desplegar y menos costosas. Se ha decidido evaluar dos tecnologías de transmisión debido a su cobertura y popularidad, considerando que se puede utilizar también la tecnología de radio frecuencia y satelital:

- Wi-Fi: Es una red de área local (LAN) que proporciona acceso a Internet dentro de un rango limitado. Utiliza frecuencias entre los 2,4 GHz y 5 GHz. Actualmente las normas de mayor auge para Wi-Fi son la familia de normas proporcionadas por el IEEE 802.11n y 802.11ac, donde cada uno de estos nuevos estándares mejora el rendimiento en estas bandas de frecuencia. La tecnología Wi-Fi presenta un ancho de banda alto, mientras que carece de un rango amplio, lo cual se compensa con la velocidad y ancho de banda. Wi-Fi se puede utilizar para aplicaciones y despliegues de Internet de las cosas (IoT) que se ejecutan en un entorno local, o en un entorno distribuido (Hernández, 2016).
- Red Celular: Es una red de área extensa (WAN) que cubre kilómetros. Se conecta a Internet a través de una serie de estaciones distribuidas en células por toda la ciudad. Cada una de estas estaciones base ofrecen cobertura de radio en un área amplia, y luego el total de la red de estaciones base puede dar acceso a través de todo el país, por ejemplo. El ancho de banda es alto (se puede transmitir indicaciones del GPS, video y audio al igual que Wi-Fi), pero también depende de la cobertura. El acceso a los datos celulares, sin embargo, es más caro que el Wi-Fi y otros tipos de redes inalámbricas (Hernández, 2016).

3.3.6.4 Software

El software para la adquisición de datos debe dividirse en diferentes bloques para recolectar, transmitir, procesar y evaluar el estado del puente utilizando un algoritmo correspondiente. Existen softwares (e.g. DAQ Embedded Software) capaces de leer los parámetros obtenidos por los nodos del sistema y analizarlos de una manera tal, que en el caso de que ocurra una anomalía en las medidas del puente, comienza a recolectar la información completa de cada nodo para transmitirla a la estación base para que pueda ser procesada. En el caso que no ocurran señales extraordinarias en las medidas y para evitar una sobreacumulación de datos, se pueden aplicar métodos estadísticos de una selección definida de datos recopilados en forma periódica, como por ejemplo obtener el promedio de los datos que entrega un sensor cada media hora, lo que permite conocer el comportamiento de la estructura, sin la sobreacumulación de datos (Whelan, et al., 2009). Junto con la acumulación de datos, el software debe ser capaz de visualizar los datos mediante alguna plataforma online para observar en tiempo real el estatus de la estructura y su historial previo.

3.4 Manejo de Datos y Procesamiento de Datos

3.4.1 Análisis de la señal

La señal generada por los sensores es comúnmente análoga, por cuanto es necesario realizar una conversión de los datos a una base digital. Previo a la digitalización se puede acondicionar la señal análoga considerando los siguientes mecanismos: (SAMCO, 2006):

- Filtro pasa altos y bajos: para filtrar ruido y efectos de variaciones de temperatura, entre otros.
- Filtro pasa banda: para mantener solo las frecuencias sensibles para la estructura.
- Integración: para convertir señales de aceleración en velocidad y desplazamiento.
- Generador de parámetros: cálculo de promedio, desviación estándar y valores máximos, entre otros.
- Análisis de frecuencias: determina el contenido espectral de la señal de respuesta en el tiempo.
- Amplificación: proceso que permite aumentar la potencia de la señal

Para cambios lentos, se pueden aplicar algoritmos para que se registren valores promedios, y solo en casos discretos, cuando se superen límites preestablecidos, se realice una medición continua. El monitoreo realiza mediciones en estado de servicio, donde se presentan cargas de tráfico, vibraciones ambientales y micro-sísmicas.

4. Análisis de Salud y Diagnóstico de la Estructura

4.1 Análisis numérico

Para el análisis numérico se requiere un modelo adecuado que contenga la rigidez, la distribución de masa y las condiciones de borde. Para la evaluación estructural, una de las técnicas más aceptadas para modelar y comparar es el análisis mediante el método de elementos finitos, el cual entrega una herramienta para efectuar predicciones analíticas y simulaciones.

El análisis numérico tiene por objetivo:

- Determinar los parámetros modales
- Verificar los resultados medidos
- Simular propiedades estructurales
- Modelar daños

4.2 Calibración de modelos estructurales

La calibración del modelo permite acercar el modelo a una situación más real de la estructura, donde se deben ajustar las propiedades mecánicas, las condiciones de borde y las condiciones de continuidad. Los modelos calibrados sirven para predecir la respuesta estructural y posibles mecanismos de falla. Esto requiere:

- Calibración del modelo, donde se modifican las propiedades mecánicas y condiciones de borde.
- Análisis de sensibilidad, donde la sensibilidad se puede definir como el gradiente local de información obtenido por la formulación analítica, que es útil para problemas de optimización.
- Utilización de modelos calibrados, corresponde a la mejor forma de conocer la condición actual de la estructura, el cual se puede utilizar para conocer la capacidad de carga y evaluar sus fuerzas internas junto con las deformaciones en condiciones de operación.

4.3 Procedimientos Dinámicos

Los métodos de análisis de datos corresponden al último proceso de SHM y permiten obtener el estado de la salud estructural de un puente. En esta etapa, se procesan los datos ya filtrados y se

puede determinar, dependiendo del nivel de complejidad del método, la presencia de daños y la ubicación de estos en la estructura (SAMCO, 2006).

El principio de estos métodos corresponde a que el daño provoca cambios en las propiedades físicas de la estructura (rigidez), los cuales generan cambios detectables en las propiedades modales de la estructura, como por ejemplo el desarrollo de las grietas genera cambios en la rigidez de la estructura (Fan, 2013).

Estos métodos se pueden dividir en dos, los métodos basados en un modelo numérico detallado de la estructura y los modelos basados en la respuesta de la estructura, que requieren de datos experimentales de la estructura (Wei & Pizhohg, 2013).

Las características dinámicas que se establecen mediante el monitoreo de vibraciones corresponden a propiedades globales de la estructura, que suelen no ser sensibles a daños locales. Por esta razón, los daños menores pueden no ser detectados a menos que sean severos. Las vibraciones globales suelen estar más afectadas por fenómenos que por daños, incluyendo efectos ambientales por cambios de temperatura o masa.

Los métodos utilizados para obtener información sobre la condición de una estructura por mediciones en las propiedades de vibración incluyen:

4.3.1 Métodos basados en la frecuencia natural

Este método utiliza la frecuencia natural de la estructura como base para la determinación de daño, ya que la frecuencia natural puede ser determinada a partir de la medición de la respuesta de uno o tan sólo algunos puntos característicos de la estructura que pueden ser seleccionados de manera que estos se ubiquen en lugares donde están menos contaminados por ruido (Wei & Pizhohg, 2013). Existen diferentes revisiones del uso del cambio de la frecuencia natural en la identificación de daño, como se muestra en (Salawu, 1997). El método se basa en que cualquier daño generado en una estructura se asocia directamente con una reducción de la rigidez de la estructura, lo que implica reducciones anormales de las frecuencias naturales y es por esto que representa uno de los parámetros más utilizados en la detección de daños (Magalhaes, et al., 2012).

El proceso consiste en calcular la disminución de la frecuencia para un cierto tipo de daño conocido que se modela matemáticamente y se comparan las frecuencias medidas con las frecuencias calculadas, donde se requiere de modelos computacionales para calcular las frecuencias de los diferentes modos de vibración, tanto para el estado no dañado como para los diferentes escenarios de daño planteados (Paredes, 2013).

Como principal ventaja de este método se puede mencionar que las frecuencias naturales de una estructura son relativamente fáciles de medir, sin embargo aunque es posible detectar la existencia de daño, la localización de daños se torna un análisis complejo debido a que dos daños son localizados en distintos sitios de la estructura que pueden ocasionar el mismo decremento en la frecuencia natural, que un único daño localizado en un solo sitio de la estructura (Paredes, 2013). Es necesario mencionar que daños estructurales locales o globales que generen cambios menores

a 1% en la frecuencia natural son prácticamente imperceptibles si solo se utiliza un análisis de frecuencias.

Una de las limitaciones de estos métodos es la dependencia del modelo estructural donde se incluyan los daños, junto con esto, el rango de los modos de vibración que es aplicable para la detección de daños corresponde solo a los primeros modos de vibrar (Wei & Pizhohg, 2013). Otra limitación corresponde a que los cambios en la frecuencia provocados por daño en la estructura suelen ser pequeños y pueden pasar desapercibidos como ruido ambiental. Finalmente, la frecuencia natural de una estructura es influenciada por efectos ambientales como temperatura y humedad, por lo cual es necesario aplicar métodos para eliminar estos efectos (Deraemaeker, et al., 2008), (Magalhaes, 2010).

4.3.2 Métodos basados en la forma modal

Los métodos dinámicos funcionan en base a señales obtenidas de sensores dentro de la estructura y el desarrollo de un modelo estructural preciso (e.g., modelo de elementos finitos), lo que les permite definir formas modales observables (Reda Taha, et al., 2014).

Es necesario mencionar que las formas modales contienen información local de la estructura, lo que los hace más sensibles a detectar múltiples daños en la estructura. Además, las formas modales son menos sensibles a efectos provocados por ruido ambiental en comparación con los métodos de frecuencia natural (Wei & Pizhohg, 2013).

Durante la historia del SHM se han utilizado dos métodos de detección de daños en base a la forma modal de la estructura: el método tradicional y el método moderno. El método tradicional intenta establecer una relación de la detección y localización de daños con un modelo computacional de la estructura, por ejemplo, un modelo de elementos finitos, por lo cual, dependen de información de la estructura no dañada y con daños. El método moderno, por su parte, se puede aplicar directamente a los datos obtenidos de estructuras dañadas, donde detectan el daño en la estructura mediante la localización de discontinuidad en la forma modal de la estructura, que es provocado por el daño correspondiente (Wei & Pizhohg, 2013).

Dentro de los métodos modernos se puede destacar la utilización del método de dimensión fractal (FD) el cual propone un algoritmo de detección de daño usando el FD de la estructura. La ubicación del daño y su tamaño se puede determinar mediante un peak en la curva de FD, la cual indica la irregularidad local de la forma modal, generada por daño (Wei & Pizhohg, 2013).

Como desventaja se puede mencionar que para detectar la forma modal de una estructura, es necesaria la implementación de un sistema más amplio de sensores en el puente, junto con que la detección de daño en el método tradicional solo sirve de forma preliminar y debe ser justificado mediante otros métodos como el análisis de la frecuencia natural (Wei & Pizhohg, 2013). Se puede encontrar mayor detalle el método en el anexo A.1 Análisis Modal.

4.3.3 Métodos basados en emisiones acústicas

El método de emisiones acústicas se basa en la detección del movimiento dinámico en la superficie de una estructura, las cuales se generan por ondas elásticas de tensiones que son generadas por la liberación espontánea de energía elástica acumulada de fallas en elementos de la estructura (Czichos, 2013).

Este método monitorea la respuesta dinámica del material frente a cargas aplicadas o ambientales, de una manera pasiva, permitiendo la detección de fuentes activas y procesos de degradación que evolucionan con el tiempo. Se puede aplicar como monitoreo local, para detección de grietas, corrosión, entre otro, o para un monitoreo global de la estructura, siendo capaz de detectar defectos crecientes (Czichos, 2013).

Para analizar las emisiones acústicas se requiere de sensores piezoeléctricos de recepciones acústicas, los cuales deben ser colocados estratégicamente en la estructura. Estos sensores convierten las ondas en una señal eléctrica para luego ser procesada por métodos computacionales (Yapar, et al., 2015).

Para la detección de mecanismos que provocan emisiones acústicas dentro de la estructura existen métodos de clasificación e identificación como el análisis de amplitud de peak de la señal, la energía y duración de la señal y los métodos avanzados como la aplicación de la FFT (Fast Fourier Transform), análisis de la onda modal o reconocimiento estadístico de patrones mediante emisiones como se muestra en (Miller & Hill, 2005), (Ono, 2007). Se presenta mayor detalle del método en el anexo A.2 Emisiones Acústicas.

4.3.4 Métodos basados en la Transformada de Fourier

La transformada de Fourier es una herramienta matemática que permite obtener, a partir de una función discreta en el tiempo, otra función discreta, que contiene toda la información de la primera, pero en el dominio de la frecuencia. La función se denomina espectro de Fourier y representa la manera como la medida de amplitud de la señal se distribuye con la frecuencia (Viviescas, et al., 2017). Debido a que los elementos de procesamiento digitales trabajan de forma discreta, se utiliza la transformada discreta de Fourier (DFT), que consiste en un muestreo uniforme en la frecuencia de la transformada de Fourier.

La DFT permite transformar una función en tiempo discreto en otra función en el dominio de la frecuencia discreta. Es importante tener en cuenta que para aplicar la DFT, se deberá definir la frecuencia a la cual se muestrea la señal continua y el número de muestras de la señal en el tiempo para obtener una resolución en frecuencia adecuada (Arias, 2015).

Otro método que se basa en la transformada de Fourier corresponde a la transformada rápida de Fourier (FFT), la cual corresponde a una de las más utilizadas en SHM debido a que se puede implementar rápidamente y es considerada una técnica eficiente para analizar señal. La FFT convierte muestras discretas de una señal continua en una representación en el dominio de la frecuencia. Como desventaja se puede mencionar que presenta problemas en situaciones donde la

estructura se ve afectada por excitaciones dinámicas (Amezquita & Adeli, 2014). Se presentan aplicaciones de FFT para análisis de señales de monitoreo de puentes en (Brincker , et al., 2001), (Lee, 2007), (Hu, et al., 2013).

4.3.5 Métodos basados en la transformada de Wavelet

La transformada de Wavelet corresponde a una técnica de procesamiento tiempo-frecuencia de la señal que ha sido capaz de superar las principales limitaciones de la Transformada de Fourier, como indicar el tiempo de ocurrencia de una señal transiente, ya que la transformada de Fourier solo se basa en información de la frecuencia de la señal. La transformada de Wavelet tiene la habilidad de entregar información de tiempo y frecuencia de una señal de manera precisa (Reda Taha, et al., 2006).

El análisis de wavelet básicamente consiste en tomar una función wavelet, comparándola con la señal original, hallando correlación local entre ambas. La función wavelet, se escala y se vuelve a comparar con la señal original, donde el escalado corresponde a una compresión o estiramiento de la función wavelet, afectando la pseudo-frecuencia de la misma. Teniendo entonces la pseudo-frecuencia de la función wavelet para cada escala, se puede identificar las frecuencias características de la señal, buscando coeficientes de correlación altos (Tischer, et al., 2007).

Existen diferentes métodos que aplican la transformada de Wavelet en la detección de daños. A continuación, se presentan 3 métodos con aplicaciones reales, mayor detalle en (García, 2016):

- Método basado en la transformada continua de wavelet (CWT): La CWT sirve de base para un procedimiento de detección de daño basado en la premisa que el daño debido a una pérdida repentina de rigidez puede ser detectada mediante formas modales con coeficientes wavelet que desarrollan grandes amplitudes en la localización del daño (Lazcano, et al., 2011).
- Método del análisis discreto de Wavelet (DWA): El procedimiento de detección de daño DWA consiste en seleccionar una wavelet adecuada y en base a ella aplicar el algoritmo Transformada Rápida Wavelet (FWT por sus siglas en inglés) a una señal en función del espacio (forma modal) para encontrar un árbol de descomposición wavelet de la señal (Lazcano, et al., 2011).
- Método basado en paquetes de Wavelets (WPS): Este método está basado en la Transformada Wavelet por paquetes para la localización del daño en estructuras. En dicho método, denominado Método Basado en Paquetes Wavelets (WPS, por sus siglas en inglés), es requerida la respuesta dinámica de la estructura para las condiciones exentas del daño y el estado actual (Lazcano, et al., 2011).

4.3.6 Métodos basados en modelos autorregresivos

Los modelos autorregresivos son utilizados para desarrollar modelos matemáticos basados en los datos obtenidos, estos se dividen en lineales y no lineales, donde los modelos lineales corresponden a los modelos más utilizados en SHM para el procesamiento y evaluación de la estructura bajo cargas dinámicas, debido a que pueden ser implementadas fácilmente y se consideran una técnica eficiente. Entre los modelos lineales más frecuentes se pueden encontrar modelos como el modelo autorregresivo (AR), promedio móvil (Moving-Average, MA) y el promedio autorregresivo móvil (ARMA), entre otros (Amezquita & Adeli, 2014). Se puede analizar aplicaciones de métodos autorregresivos en (Carden, 2008) y (Nair & Kiremidjian, 2006).

Como ventaja se puede mencionar que los métodos autorregresivos son fáciles de implementar y existe una diversidad de modelos que se pueden implementar para SHM. Como desventaja se puede mencionar que los métodos autorregresivos pueden ser sensibles al ruido ambiental (Amezquita & Adeli, 2014).

Entre los métodos estadísticos también se presentan los métodos de detección de daños basados en momentos estadísticos (SMBDD por sus siglas en inglés). A continuación, se presentan dos casos donde se aplican estos métodos (García, 2016):

- SMBDD en el dominio de la frecuencia: El principio básico del método de SMBDD es identificar los parámetros de rigidez de una estructura antes y después de la ocurrencia de daño a través de una actualización del modelo de elementos finitos (FE) que usa los momentos estadísticos totalmente o, muy probablemente, las respuestas estructurales parcialmente medidas y entonces determina las localizaciones del daño y sus severidades comparando los parámetros de rigidez estructurales identificados en las dos fases (Xu, et al., 2011).
- SMBDD en el dominio del tiempo: Hablando teóricamente, el método de SMBDD puede aplicarse a las estructuras en el dominio de frecuencia solo cuando las excitaciones externas obedecen las distribuciones Gaussianas. Este requisito limita la aplicación del método de SMBDD a las excitaciones externas no-Gaussianas. En este aspecto, el método de SMBDD ha sido extendido y se ha llevado a cabo en el dominio del tiempo para las excitaciones externas no-Gaussianas y no-estacionarias con la consideración de medidas incompletas (Xu, et al., 2011). Estos métodos no necesitan disponer de un modelo matemático detallado de la estructura para detectar el daño o conocer el estado de la estructura previo al daño (Lazcano, et al., 2011).

4.4 Definición de Alarmas

Es necesario evaluar para cada parámetro de medición, los límites de operación de los sensores tal que sean indicadores de un síntoma anormal de operación, deterioro o daño de la estructura. Un método simple para definir límites de alarmas es la comparación de datos obtenidos del monitoreo con valores umbrales que pueden ser elegidos de manera preliminar, los cuales pueden ser obtenidos de códigos y normas, así como de investigaciones y de experiencia propia.

Se pueden establecer diferentes categorías para la definición de alarmas o límites que permitan informar situaciones anormales, los cuales se presentan a continuación (Martínez, et al., 2016):

- Límites normales de operación: En esta categoría se obtienen límites considerando valores estadísticos de parámetros estructurales a partir de los datos registrados por el monitoreo continuo bajo condiciones de operación normal. Como ejemplo se describe una metodología correspondiente:
 1. Extraer valores crudos registrados por sensores.
 2. Calcular el valor de la media representante de n minutos de adquisición.
 3. Unir los valores de las medias obtenidas en un vector que constituya m días de adquisición.
 4. Ajustar distribución estadística de las medias obtenidas.
 5. Obtener distribución estadística que represente el comportamiento de cada sensor.
 6. Definir cantidad y rangos de los límites.
- Límite de diseño: Los cuales se basan en los valores máximos de los parámetros estructurales proyectados por el diseñador, obtenidos mediante modelaciones numéricas, códigos y normas.
- Límite de resistencia de materiales: Representando el mayor grado de daño que puede sufrir los elementos estructurales críticos, aquellos más susceptibles a la falla. Se basa en las capacidades físicas de los materiales empleados en la estructura, usualmente expresado como porcentaje de fluencia o resistencia última de los elementos estructurales críticos.
- Límites basados en Simulación Montecarlo y/o curvas de fragilidad: Cuando no se tiene información dada por alguna instrumentación de la estructura, esta aproximación se basa en datos estadísticos de cargas dinámicas a la que estructura está expuesta, mediante un modelo de elementos finitos.

5. Análisis de Tipología de puentes Nacionales

5.1 Estudio de Red vial crítica

Para el estudio de la red vial crítica, se presenta información relevante sobre los puentes de la red de transportes de Chile, la cual se obtuvo mediante el documento realizado por el MOP nombrado “Red Vial Nacional: Dimensionamiento y Características (2015)”. Este documento es desarrollado por el Departamento de Gestión Vial de la Subdirección de Desarrollo de Vialidad, para entregar información actualizada de la infraestructura vial existente a diciembre del año 2015. En él se describen de manera general la longitud de la red vial, caminos pavimentados, caminos básicos intermedios, obras concesionadas, túneles, ciclovías, puentes y pasarelas divididas por región. Es necesario mencionar que la Red vial crítica sigue sin estar definida por el MOP, por lo cual la utilizada en este documento debe ser considerada como una opinión personal.

A pesar que existen ediciones más recientes del documento, el del año 2015 fue el último que, hasta la fecha, incluye el estudio de la red de puentes del país. En el capítulo de puentes, se presenta un detalle de la identificación, ubicación y características generales de los puentes. En la Tabla 5-1 a continuación se presenta un resumen de los puentes de la red vial nacional.

Tabla 5-1: Resumen de los puentes de la Red Vial Nacional a Diciembre de 2015.

Región	N° Puentes	Longitud Total (m.)
I	8	386
II	19	985
III	51	1.870
IV	188	8.266
V	261	13.622
VI	350	14.678
VII	703	25.362
VIII	1.918	38.167
IX	1.204	27.520
X	693	19.534
XI	310	9.381
XII	97	2.785
R.M.	281	15.491
XIV	496	15.585
XV	14	756
Total	6.593	194.390

Para el presente análisis se consideran como estructuras de la red vial crítica solo los puentes pertenecientes a la Ruta 5, ya que esta corresponde a la ruta más transitada y la que permite la conectividad del país desde Norte a Sur.

Del documento realizado por el MOP, se puede obtener información sobre la longitud de cada uno de los puentes, junto con el tipo de material utilizado en la infraestructura, las vigas y el tablero. La Tabla 5-2 resume los valores obtenidos de cada puente por las regiones correspondientes en.

Tabla 5-2: Resumen material de construcción de diferentes elementos de los puentes

<i>Región</i>	<i>Longitud Promedio (m)</i>	<i>Material</i>	<i>Infraestructura</i>	<i>Vigas</i>	<i>Tablero</i>
I	58,55	H (Hormigón)	2	1	4
		A (Acero)	2	3	0
III	29	H	5	3	5
		A	0	2	0
IV	97,43	H	34	28	34
		A	0	6	0
V	68,92	H	31	29	31
		A	0	2	0
VI	84,59	H	26	25	26
		A	0	1	0
VII	103,34	H	67	67	67
		A	0	0	0
VIII	68,74	H	106	95	106
		A	0	11	0
IX	49,92	H	18	13	18
		A		5	
X	54,70	H	50	46	50
		A	0	4	0
RM	73,08	H	9	5	11
		A	2	6	0
XIV	73,83	H	43	27	43
		A	0	16	0
XV	90,40	H	4	2	5
		A	1	3	0

Para resumir, se observa en la Tabla 5-2 que la longitud promedio de los 400 puentes pertenecientes a la ruta 5 corresponde a 71 m. Al observar el tipo de material utilizado para la construcción de las diferentes secciones, se observa que en el 99% de los casos la infraestructura corresponde a hormigón, para las vigas el 85% corresponde a hormigón y para el tablero el 100% corresponde a hormigón.

Tabla 5-3: Resumen y porcentaje total de materiales de construcción.

<i>Total</i>	<i>Infraestructura</i>	<i>Vigas</i>	<i>Tablero</i>
Hormigón	395	341	400
Acero	5	59	0
Total	400	400	400
% Hormigón	99	85	100
% Acero	1	15	0
Promedio longitud (m)			
71,04			

Junto con el estudio del documento previo, se analizó el documento (Wilches, et al., 2019), que presenta un puente representativo de los puentes viales de Chile, mediante un estudio estadístico de los puentes nacionales.

El estudio menciona que en Chile los puentes con vigas de hormigón pretensados simplemente apoyados, corresponden al tipo de puente más común construido, los cuales corresponden al 38% del total, en donde el 23% corresponde a puentes rectos y el 15% a puentes esviados.

Por esto, y considerando los datos obtenidos previamente, se selecciona una estructura representativa de los puentes viales pertenecientes a la red vial crítica seleccionada como un puente recto, con superestructura de hormigón armado, cuatro vigas pretensadas simplemente apoyadas, con un ancho de puente de 11.5m considerando dos pistas vehiculares, con dos tramos de 35.5 m entre apoyos, y una infraestructura de hormigón armado, como se muestra en la figura a continuación.

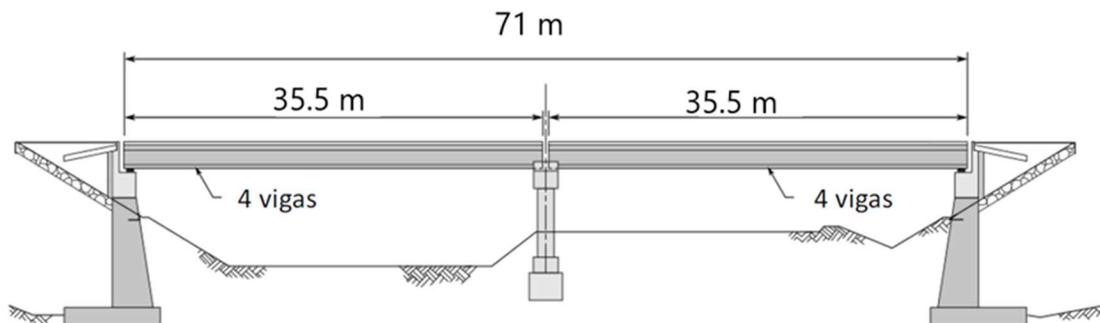


Ilustración 5-1: Representación de tipología seleccionada

5.2 Análisis de daños en Tipología seleccionada

Una vez obtenida la tipología correspondiente a la estructura representativa de la red vial crítica en Chile, se procede a analizar sus fallas más comunes, las cuales corresponden a:

- Socavación (inclinación)
- Fisuramiento
- Corrosión
- Impactos
- Movimiento de tableros (sismos)
- Corte barras antisísmicas (sismos)
- Descenso de terraplén en losas de acceso
- Daños de juntas de dilatación
- Daños en topes sísmicos

5.2.1 Daños observados durante el Terremoto 27/F

Junto con el estudio de la tipología de puentes descrita en el documento “Evaluación de las disposiciones de diseño de puentes chilenos mediante curvas de fragilidad” (Wilches, et al., 2019), se presentan los daños presenciados tras el terremoto del 27 de febrero de 2010. En total se observaron 79 puentes con daños, de los cuales 41 (51%) puentes corresponden a vigas simplemente apoyadas con hormigón pretensado. Estos puentes se ubicaban en zonas donde la Intensidad de Mercalli Modificada (IMM) fluctuó entre VI y VIII. Los principales daños observados corresponden a:

- Desplazamiento de tablero
- Colapso de tablero
- Daño de tope sísmico
- Descenso de Terraplén de acceso
- Daño de barra antisísmica
- Daño de estribos
- Daño de cepas
- Daño de vigas
- Daño de placa de apoyo

La caracterización de daños provocada por el terremoto del Maule el 27 de febrero del 2010, de acuerdo con la tipología elegida, se presenta en la Ilustración 5-2 a continuación, donde se dividió la caracterización de daños en base a la zona sísmica en la que se encontraban las estructuras considerando la zonificación considerada por el Manual de Carreteras (MOP, 2012):

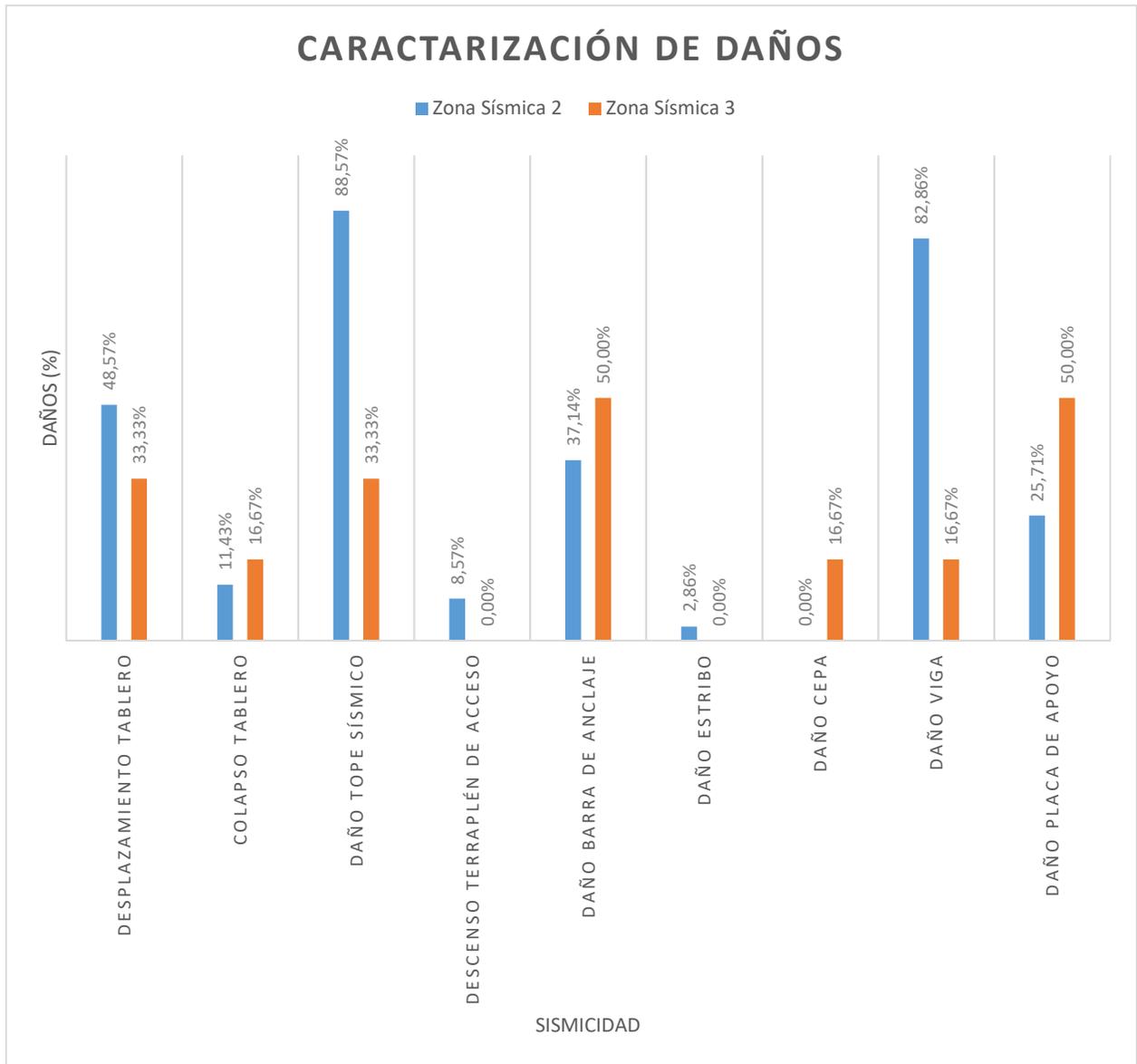


Ilustración 5-2 Caracterización de daños observados durante terremoto del Maule del 27 de febrero de 2010.

Como se observa, los principales daños que se presentaron en las estructuras correspondieron a daños en los topes sísmicos, daños debido a impactos transversales en las vigas, desplazamientos residuales del tablero, daños en las placas de neopreno y daños de barras antisísmicas, en especial en zona sísmica 2, donde se observó la ausencia de travesaños transversales, una longitud insuficiente de la mesa de apoyo y/o la utilización de topes sísmicos laterales insuficientes.

5.3 Metodologías de Inspección de puentes

Para comprender el estado actual de la inspección de puentes, se realiza una investigación de las diferentes metodologías disponibles, analizando documentos como el Manual de Carreteras y sistemas no oficiales implementados por diferentes empresas de inspección operando en Chile.

5.3.1 Manual de carreteras

El Manual de Carreteras (MOP, 2012) corresponde a un documento técnico que se utiliza como referente nacional para la planificación, evaluación, diseño, mantención y seguridad de todos los elementos pertenecientes a la Dirección de Vialidad. En el volumen 7 de este documento, referido a Mantenimiento Vial, se presenta un capítulo de necesidades de mantenimiento en puentes y estructuras viales, donde se menciona que los puentes corresponden a la unidad de mayor inversión por unidad de longitud de camino, y que cualquier pérdida de capacidad de operación en estos se percibe como muy perjudicial. Por ende, es necesario caracterizar el mantenimiento de estas obras como una labor fundamental en la administración de una red vial.

De acuerdo al procedimiento de inspección de los puentes descrito en el Manual de Carreteras, es necesario rellenar inicialmente la ficha de registro, en donde se describen las características geométricas, junto con su nombre, ubicación, cantidad de tráfico que percibe por día y el grado de daño que pueda presentar con una nota de 1 a 5, donde 1 corresponde a un puente con peligro de colapso o con un daño serio. Esta ficha fue el resultado del trabajo realizado por la JICA (Agencia de Cooperación Internacional del Japón) en los años noventa.

Luego, se procede con la ficha de inspección, la cual corresponde a una tabla en donde se le coloca una nota de 1 a 5 a los diferentes elementos principales de la estructura, como se muestra en el ejemplo de inspección de un puente en la Tabla 5-4.

En la Tabla 5-4 se mencionan las fallas más comunes de cada uno de los elementos, junto con la evaluación de cada uno de los posibles daños, donde el 5 no presenta daños y el 1 corresponde a una situación de emergencia. También se presenta una sección de comentarios, donde se pueden mencionar las diferentes acciones e intervenciones que se realizaron, como reconstrucciones, reparaciones u otros.

Estas dos fichas representan el proceso requerido por el Manual de Carreteras, el cual solo entrega solamente una evaluación subjetiva de los daños.

Tabla 5-4: Ejemplo de ficha de Inspección de puentes (MOP, 2012).

NOMBRE DEL PUEENTE	KILOMETRO	NOMBRE DE LA VIA		ROL DE LA RUTA		PROVINCIA Y REGION	CODIGO DEL PUEENTE	
ANTIGUO LIMARI	377,97	5 NORTE		R-5		LIMARI		
TIPO DE DAÑO O DETERIORO Y SU CANTIDAD								
1 PAVIMENTO	ITEM	¹ ALABEO	² ENSURCAD O O CARRILES	³ FISURAMIENTO	⁴ ASENTAMIENTO	⁵ OTROS	COMENTARIOS	
	Grado o cantidad	5	5	5	5			
2 BARANDAS	ITEM	¹ DEFORMACION	² OXIDAMIENTO	³ CORROSION	⁴ FISURAMIENTO	⁵ ARMADURA AL AIRE		⁶ OTROS
	Grado o cantidad	5	5	5	5	5		
3 JUNTAS DE EXPANSIÓN	ITEM	¹ SONIDOS EXTRAÑOS	² FILTRACION DE AGUA	³ DEFORMACION	⁴ MOVIMIENTOS VERTICALES	⁵ JUNTAS DESTRUIDAS		⁶ OTROS
	Grado o cantidad	5	5	5	5	4		
4 LOSA	ITEM	¹ FISURAS EN UNA DIRECCION	² FISURAMIENTO EN RED	³ DESCASCAMIENTO	⁴ ARMADURA AL AIRE	⁵ NIDOS DE PIEDRAS		⁶ EFLORESCENCIA
	Grado o cantidad	5	5	5	5	3		3
5 RIOSTRAS PTES. ACERO	ITEM	¹ OXIDAMIENTO	² CORROSION	³ DEFORMACION	⁴ ROTURAS DE LAS UNIONES	⁵ ROTURAS DE ARRIOSTRAMIENTOS		⁶ OTROS
	Grado o cantidad							
*Se ha ejecutado la reconstrucción de los 4 pilares Gerber que soportan la losa de empalme del par de arcos parabólicos del extremo sur.								
*Reparación: Sellado de fisuras del estribo sur.								
* Se ha reparado barandas impactada y baranda con grieta, octubre 2004								
*Se ha ejecutado durante los primeros días de agosto 2005 la reconstrucción de la baranda lado poniente del estribo norte la								

6 VIGA PRINCIPAL DE ACERO (EN CERCHAS)	ITEM	1 OXIDAMIENTO	2 CORROSION	3 DEFORMACION	4 PERDIDAS DE PERNOS	5 FISURAS EN SOLDADURAS	6 OTROS	cual fue destruida en un accidente el día 31 de julio 2005
	Grado o cantidad							
7 RIOSTRAS PTES. CONCRETOS	ITEM	1 FISURAS EN UNA DIRECCION	2 FISURAMIENTO EN RED	3 DESCASCAMIENTO	4 ARMADURA AL AIRE	5 NIDOS DE PIEDRAS	6 EFLORESCENCIAS	
	Grado o cantidad							
8 VIGA PRINCIPAL DE CONCRETO	ITEM	1 FISURAS EN UNA DIRECCION	2 FISURAMIENTO EN RED	3 DESCASCAMIENTO	4 ARMADURA AL AIRE	5 NIDOS DE PIEDRAS	6 EFLORESCENCIAS	* Se aprecian varios sectores de aceras peatonales con desconches y armadura a la vista.
	Grado o cantidad	5	5	4	4	5	5	
9 APOYOS	ITEM	1 ROTURA DEL APOYO	2 ROTURA DE ACCESORIOS	3 SALIDA DE ANCLAJES	4 ROTURAS DEL DISCO	5 DEFORMACIONES RARAS	6 OTROS	* Calzada: asfalto craquelado 1 m2 en pista nº 4
	Grado o cantidad	5	5	5	5	5		
10 ESTRIBOS	ITEM	1 GRIETAS O DESCASCAM.	2 FISURAS A PARTIR APOYO	3 ROTURA DEL PARAPETO	4 INCLINACIONES	5 SOCAVACIONES	6 OTROS	* Se aprecia una filtración de agua desde la calzada hacia la losa a través de una fisura en pista nº 4.
	Grado o cantidad	5	5	5	5	5		
11 CEPAS	ITEM	1 GRIETAS O DESCASCAM.	2 FISURAS A PARTIR APOYO	3 DEFORM. DE CANTILEVER	4 INCLINACIONES	5 SOCAVACIONES	6 OTROS	* Se aprecia armadura a la vista en viga lado poniente.
	Grado o cantidad	4	5		5	5		

12 PINTURA	ITEM	1 DECOLORACION	2 OXIDAMIENTO	3 AMPOLLAMIENTO	4 DESCASCAMIENTO	5 OTROS		EVALUACION	GRADO DE DEGRADACION	SOCAVACION
	Grado o cantidad							5	NO EXISTE	NO EXISTE
13 ARTICULACIONES DE VIGAS GERBER	ITEM	1 FISURAS EN UNA DIRECCION	2 FISURAMIENTO EN RED	3 AGRIETAMIENTO	4 ARMADURA AL AIRE	5 NIDOS DE PIEDRAS	6 EFLORESCENCIAS	4	EN UNO O DOS PUNTOS	TENDENCIA A SOCAVAR
	Grado o cantidad	3	5	5	5	5	3	3	EN MUCHOS PUNTOS	EXISTE PERO NO HAY PELIGRO
14 OTROS	ITEM	1 DERRUMBE TALUD. ESTRIBO	2 DAÑOS POR IMPACTO O ROCAS	3 DAÑOS EN CABO VIGAS	4 SE EFECTUO REPARACION?	5 OTROS		2	MENOS DE LA MITAD	SOCAVACION PELIGROSA
	Grado o cantidad				Si			1	CASI TODO	SITUACION DE EMERGENCIA
COMENTARIOS ESPECIALES	1 EXISTIERON DESBORDAMIENTOS				1 EXISTEN EMPRESTITOS DE MATERIAL			FECHA INSPECCION	NOMBRE INSPECTOR	
	a. SI b. NO X c. NO SE SABE				a. SI b. NO X			DIC/2008	JEAN CATHALIF AUD	FIRMA

5.4 Parámetros y clasificación de deterioros de puentes

Para el análisis de los puentes, el MOP ha propuesto tablas para el primer prototipo de Monitoreo Estructural de Puentes del país las cuales aún no han sido incorporadas dentro del Manual de Carreteras, que establecen parámetros o efectos que son relevantes monitorear y/o medir en diferentes componentes estructurales con el objetivo de poder determinar su estado estructural o deterioro(MOP, 2019).

Tabla 5-5: Parámetros relevantes de deterioros según elementos del puente (MOP, 2019).

	ITEM	PARÁMETRO	
SUBESTRUCTURA	Cimentación	Profundidad de socavación	
	Estribos	Desplazamiento vertical del estribo	
		Inclinación estribo	
		Presión del terreno en los muros	
		Desplazamiento diferencial entre estribos y aletas laterales	
		Presión en el murete de guarda	
	Pilas	Desplazamiento vertical pilas	
		Inclinación de pila	
		Abertura de fisura en la unión de pila y tajamar	
		Aberturas de fisura (resto)	
	SUPERESTRUCTURA	Tablero de vigas	Desplazamientos en elementos del tablero
			Corrosión (Intensidad de corriente eléctrica)
Abertura de fisuras			
Tablero tipo losa		Descascarillamientos	
		Abertura de fisuras	

	Tableros tipo viga en cajón	Abertura de fisuras
	Tableros metálicos	Acortamiento por pandeo de elementos
		Abertura de fisuras
		Deformaciones excesivas en elementos
		Roturas locales
		Corrosión (Intensidad de corriente)
	Mampostería	Abertura de fisura en arcos y bóvedas
		Formación de rótulas
	Atirantados	Elongación de los cables
		Deterioro de las protecciones de los cables (recubrimientos)
		Tensión en los cables
		Deformaciones excesivas en elementos
Elementos de unión	Aparatos de apoyo	Corrosión en apoyos metálicos
		Desplazamientos y tensiones
	Juntas de movimientos	Desplazamientos en elementos del tablero
Mal estado de las juntas y/o aparatos de apoyo		
Relacionados con equipamiento	Equipamiento, pavimentos y acabados	Mal estado del pavimento
		Desconchamientos de pintura y corrosión en elementos (intensidad de corriente, precipitación, humedad ambiental y temperatura)
		Mal estado de desagüe (precipitación)
		Humedades / eflorescencias / ataque químico (pH)

Tabla 5-6: Clasificación de deterioros según elementos del puente (MOP, 2019).

		DETERIORO		
SUBESTRUCTURA	Cimentación	Descalce de cimentaciones superficiales (zapatas, losas, etc.)		
		Socavación en cimentaciones profundas (pilotadas, pantallas...)		
	Estribos	Asentamiento vertical del estribo		
Giro del estribo según eje transversal				
Giro del estribo según eje longitudinal				
Empuje excesivo sobre los muros				
Diferencia de desplazamientos entre estribos y aletas laterales				
Pilas	Empuje excesivo sobre el murete de guarda			
	Asentamiento de pilas			
	Giro de pila según eje transversal			
	Giro de pila según eje longitudinal			
	Fisuración en la unión de pila y tajamar			
	Fisuración por pandeo			
	Fisuración por compresiones excesivas			
Fisuración por cortante				
SUPERESTRUCTURA	Tablero de vigas	Fisuración por impacto		
		Deformaciones excesivas en elementos del tablero		
		Daños por corrosión en vigas		
		Fisuras por asiento plástico		
		Fisuras por arrastre de cortante		
	Tablero tipo losa	Fisuración por fallo de adherencia anclaje		
		Pérdida de recubrimiento		
		Fisuras por concentración de tensiones		
	Tableros tipo viga en cajón	Fisuras bajo los alveolos (en vigas aligeradas)		
Fisuras de cortante por excentricidad de los apoyos respecto a las almas				
		Fisuración por contracción térmica diferencial entre losa inferior delgada y almas (más gruesas)		

		Fisuras en zonas de anclajes intermedios
	Tableros metálicos	Pandeo local
		Pandeo general
		Fisuras de flexión
		Deformaciones excesivas en elementos
		Entallas o roturas locales en uniones
		Ausencia de elementos de unión (pernos, remaches, soldadura...)
		Corrosión
	Mampostería	Agrietamiento en arcos y bóvedas
		Formación de rótulas
	Atirantados	Pérdida de resistencia de los cables
		Deterioro de las protecciones de los cables (recubrimientos)
Fatiga		
Variación en la tensión de los cables		
Deformaciones excesivas del tablero		
Elementos de unión	Aparatos de apoyo	Corrosión en apoyos metálicos
		Despegue
		Pérdida de posición teórica original
		Exceso de compresión
		Exceso de deformaciones o movimientos / tensiones
		Pátinas
	Rotura/insuficiencia de capacidad de las fijaciones	
	Juntas de dilatación / movimientos	Movimiento impedido
		Degradación del material / ausencia de junta
		Falta de estanqueidad
Mal estado de las fijaciones o su protección		
Relacionados con equipamiento	Equipamiento, pavimentos y acabados	Grietas y discontinuidades en pavimentos
		Roderos / Baches / IRI
		Deterioro de barreras y protecciones y señalización (oxidación, pintura, vandalismo...)
		Rotura de barreras
		Obstrucción de desagües
		Humedades / eflorescencias / ataque químico

5.5 Prototipo de sistema de monitoreo para tipología seleccionada

En concordancia con lo mencionado previamente en el estudio de la tipología representativa de la red vial crítica del país, la cual se muestra en la Ilustración 5-2, y en base a un estudio del estado del arte de diferentes aplicaciones de sistemas de monitoreo de puentes, se procede a definir un prototipo de sistema de monitoreo.

El objetivo de este prototipo es conocer el comportamiento general de la estructura mediante un monitoreo global del puente. Para esto, y siguiendo el diseño que se ha detallado en esta tesis, se considera la caracterización de la estructura resuelta por el estudio de la tipología y sus daños probables.

Se selecciona una estructura representativa de los puentes viales pertenecientes a la red vial crítica, correspondiente a un puente recto, con superestructura de hormigón armado, cuatro vigas pretensadas simplemente apoyadas, con un ancho de puente de 11.5 m, que cuenta con dos pistas vehiculares, con dos tramos de 35.5 m entre apoyos, y una infraestructura de hormigón armado, como se muestra en la figura 5-1.

5.5.1 Identificación de parámetros

Considerando los principales mecanismos de daños de los puentes, descritos en la sección 5.2 Análisis de daños en Tipología seleccionada, es necesario monitorear el comportamiento de la estructura de manera global mediante sus formas modales, lo que puede permitir la detección y localización de daños en la estructura. La mayoría de los efectos dinámicos en la estructura son provocados por el tránsito de vehículos, aunque las cargas estáticas también aportan información valiosa.

Según lo descrito en el documento, las fallas más probables de una estructura corresponden a la socavación en alguno de los elementos de la infraestructura, daños en las vigas como fisuramiento de estas o corrosión, daños en el tablero o en las juntas de dilatación.

Para conocer el comportamiento estructural del puente de forma global, es necesario dar seguimiento de manera independiente a parámetros fundamentales como la deformación en ciertos elementos estructurales del puente, como las vigas principales. Junto con esto se considera necesario monitorear la inclinación de las pilas a fin de detectar eventuales procesos de socavación.

5.5.2 Selección de sensores

Para monitorear los parámetros descritos previamente, se considera la implementación de acelerómetros, los cuales permiten conocer las aceleraciones de los puntos característicos necesarios para obtener las formas modales de la estructura, información que puede ser complementada con los desplazamientos obtenidos por sensores GPS. El análisis de las formas modales de un puente se puede utilizar para conocer a grandes rasgos el comportamiento de la estructura, lo que puede detectar daños a lo largo de la estructura mediante un monitoreo global de

esta. Para el monitoreo de la socavación de la estructura se seleccionan los inclinómetros, instrumentos precisos que detallan el inicio y avance de socavación en el caso de que se provoque este fenómeno, mientras que para evaluar los estados tensionales a lo largo de la estructura se considera la aplicación de galgas extensiométricas ubicadas en las vigas de la estructura.

Considerando que los acelerómetros deben medir las vibraciones de la estructura de una manera precisa, y que según lo descrito por la experiencia de monitorización en (Whelan, et al., 2007) las aceleraciones percibidas por un puente similar, ya sea por cargas ambientales o de tráfico, varían entre 2 mg y 10 mg, por lo cual los instrumentos deben corresponder a acelerómetros triaxiales, y contar con una precisión de $\pm 1 \mu\text{G}$. El sistema GPS, a su vez, debe medir, por lo menos, en dos ejes el desplazamiento de la estructura y poseer una precisión de $\pm 0.3 \text{ mm}$. Para la evaluación de los estados tensionales de la estructura, se requiere el uso de galgas extensiométricas con una precisión de $\pm 1.4 \mu\text{E}$. Para la evaluación de inclinaciones, se requiere de inclinómetros con una precisión de $\pm 0.01^\circ$.

Se recomienda la utilización de sensores MEMS inalámbricos, como una alternativa de los sensores convencionales, debido a que estos últimos requieren de una alimentación de poder directa la cual en estructuras más alejadas podría resultar complejo e implicar una mayor inversión económica. Los instrumentos inalámbricos presentan una instalación simple en la estructura, comparado con los sistemas conectados, debido a su tamaño y aunque a veces la localización de estos puede ser compleja, hoy en día existen en Chile camiones de inspección de puentes que facilitan esta tarea, como se muestra en la imagen 5-3. Los sensores MEMS, debido a su tamaño, permiten colocar varios sensores en un solo nodo, lo que facilita acoplar los acelerómetros con los sistemas GPS y las galgas extensiométricas. Estos sensores tienen una demanda de energía menor, siendo capaces de funcionar por más de un año y medio solamente con 2 pilas AA, lo cual, considerando un período de mantención del sistema de monitoreo, es razonable, considerando que las concesionarias deben realizar una inspección anual de sus estructuras viales. En consideración con lo mencionado, y debido a la alta frecuencia de muestreo se recomienda un software tipo TinyOS para la conexión entre los nodos de sensores inalámbricos MEMS.

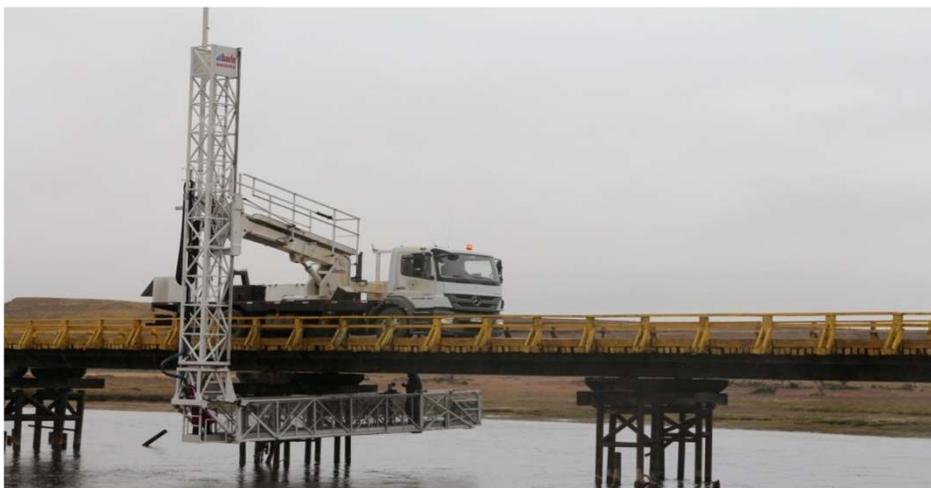


Ilustración 5-3: Camión Inspección MOP (MOP, 2019).

La cantidad y ubicación de estos sensores en la estructura se determina en conformidad con lo investigado en el capítulo 6 por (Mayorga, 2016), y en los documentos (Pérez, 2014) y (Pérez, et al., 2012), los cuales requieren contar con un criterio fundamentado para definir la ubicación de los puntos óptimos de medición. Estos se basan en el algoritmo del Método Independiente Equivalente (Kammer, 1991) que permite calcular los puntos óptimos de medición donde se deben colocar los acelerómetros en el tablero de un puente, de acuerdo a sus formas modales, para lo que se utiliza la técnica de Descomposición en el Dominio de la Frecuencia (FDD, por sus siglas en inglés). De esta manera, a partir de un número de puntos de medición definido se calculan los puntos óptimos de medición en el tablero, como se muestra en la Ilustración 5-4.

Según lo analizado, se considera la instalación de 13 acelerómetros distribuidos según lo descrito por la Ilustración 5-4 a lo largo del tablero, los cuales deberían ser capaces de obtener por lo menos las primeras 4 formas modales de la estructura (Whelan, et al., 2009), los acelerómetros deben estar instalados en el tablero de la estructura como se muestra en la Ilustración 5-4. Una galga extensiométrica por cada viga, dando un total de 8 sensores, las cuales se instalan en la mitad de la luz de cada viga y un inclinómetro por estribo y cepa, con un total de 3 sensores, los cuales deben ubicarse en el centro de la cepa o estribo como se muestra en la Ilustración 5-5. Es necesario indicar que los métodos utilizados no consideran sensores en los extremos debido a que los modos de vibrar no presentan variaciones en tales lugares y los métodos se basan en dicha información para establecer la ubicación óptima de sensores. Por tal razón, el diseñador debe aplicar su juicio y experiencia en materia de diseño estructural y construcción para evaluar los resultados y efectuar el ajuste necesario para contar con un diseño confiable. De acuerdo a este análisis, es necesario instalar un sensor en cada extremo del tablero del puente para tener una aproximación global y holística de la configuración deseada.

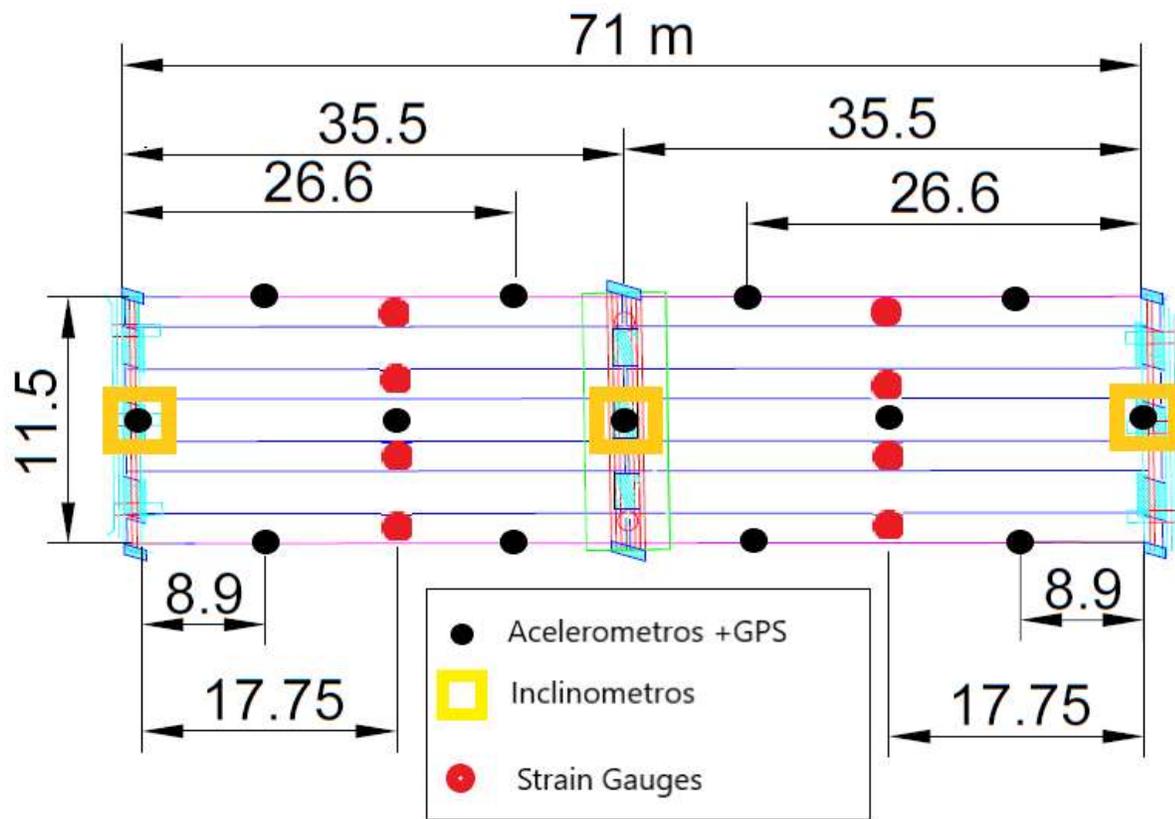


Ilustración 5-4: Vista superior de instalación de sensores.

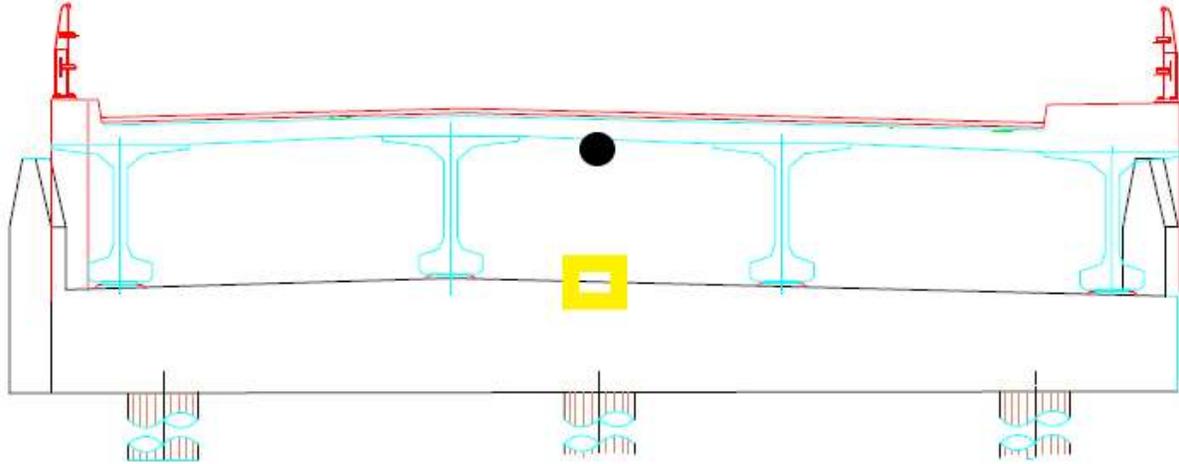


Ilustración 5-5: Vista Corte a L/2, instalación de sensores

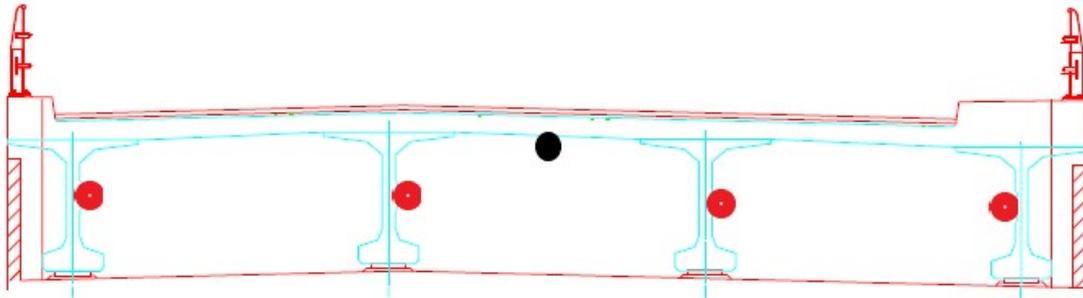


Ilustración 5-6: Vista corte a L/4 instalación de sensores

5.5.3 Sistema de adquisición de datos

Para asegurar un correcto registro de datos, la frecuencia de muestreo no debe ser menor a 150 Hz, por lo que se puede esperar, en base a lo descrito por (Whelan & Janoyan, 2009) y (Noel, et al., 2017) que la transferencia de datos sea aproximadamente de 100 kbps de información sin procesar. Para procesar la información se requiere de una estación de adquisición, transferencia y almacenamiento temporal de la data recolectada por los sensores, esta estación suele estar compuesta por un computador capaz de procesar la información, un emisor de señal telefónica para transmitir los datos y una fuente de poder que puede corresponder a una batería de auto la cual es capaz de sustentar el sistema de adquisición de datos durante un período concordable con el de los

sensores. El computador debe presentar características mínimas como un procesador i5 o equivalente, una memoria RAM de 4 GB y un disco duro de 1 TB para ser capaz de almacenar la información recopilada por los sensores.

El sistema de adquisición de datos se basa en el protocolo Zigbee (Noel, et al., 2017) para facilitar la transferencia de datos entre los nodos inalámbricos y el sistema de procesamiento de datos, el cual considera un sistema Wi-Fi para la transferencia de datos entre los nodos presentes en la estructura y una transferencia de datos mediante red celular para la transferencia al sistema de procesamiento.

5.5.4 Análisis de Salud y Diagnóstico

Considerando que no existe un modelo computacional de la estructura y en base a la información que se obtendrá mediante los sensores por colocar en el puente, se procede a definir como método de análisis de la salud estructural el método basado en la forma modal moderno de dimensión fractal (Wei & Pizhohg, 2013) junto con un estudio estadístico de los datos, el cual genera una base de datos de valores medios de las mediciones a ser comparados con datos futuros.

La definición de alarmas se basa en los límites normales de operación, donde se calcula la media representativa de un cierto período de tiempo, para definir la cantidad y rangos de los límites, junto con límites de diseño. Otro método a emplear corresponde a la simulación Monte Carlo, el cual es un análisis que predice el comportamiento de las líneas de tendencia de la deformación en las galgas extensiométricas de las vigas principales.

6. Documento técnico

En el capítulo presente se detalla una propuesta de documento técnico con recomendaciones preliminares para llevar a cabo el monitoreo de los puentes pertenecientes a red de transporte de Chile, el cual se debe considerar como el corolario de esta memoria.

6.1 Antecedentes Generales

Un sistema de Monitoreo de la Salud estructural (SHM) corresponde a un medio para caracterizar el desempeño de una estructura, considerando a la vez la detección de daños durante el tiempo, lo que permite obtener información sobre la integridad de la estructura. Un sistema de SHM consiste en una red de sensores, un sistema de adquisición de datos y un sistema responsable del análisis e interpretación de los datos, mediante análisis de las mediciones, un análisis de límites admisibles, estadísticos u otros.

El objetivo de un SHM es monitorear in situ el comportamiento de una estructura de manera precisa y eficiente para verificar su rendimiento bajo diferentes cargas de servicio, lo que le permite detectar deterioro en la estructura o la progresión del daño durante el tiempo y así conocer su condición actual. La información obtenida por este sistema debe ser incorporada en estrategias de mantención y manejo de la estructura.

El monitoreo estructural se puede diferenciar en monitoreo local o global, donde el monitoreo local se centra en determinar el comportamiento de los componentes más vulnerables de la estructura cuantificando el daño y su desarrollo en el tiempo e identificar las causas de estos, mientras que el monitoreo global tiene como principal función detectar la existencia de daño a lo largo de toda la estructura y localizarlo, de una manera cuantitativa, mediante la recolección de información del puente.

La identificación de daños de un sistema de monitoreo estructural considera 4 niveles, donde el alcance del sistema de monitoreo estará definido por la complejidad de este. Los niveles considerados son los siguientes:

1. Detección de daño.
2. Localización.
3. Cuantificación: determinación de la severidad del daño.
4. Pronóstico: predicción de la vida útil de la estructura.

6.2 Consideraciones

Debido a la cantidad de datos que puede generar un sistema de monitoreo estructural, es necesario considerar que un SHM que utiliza una menor cantidad de sensores con un análisis de los datos adecuado es más práctico y útil para conocer el estado de una estructura, que un sistema con una red de sensores compleja y un análisis deficiente, ya que se disminuye la cantidad de información que se requiere manejar y el análisis entrega datos prácticos.

Un diseño genérico de un SHM se puede dividir en:

- Caracterización de la estructura: Corresponde a la etapa donde se describe la información de diseño, cargas, mantenciones, etc., para lo cual es necesario considerar:
 - Dimensiones físicas.
 - Determinación de rangos esperables de deformaciones y cargas.
 - Estudio de condiciones ambientales a las que se verán enfrentados los sensores.
- Identificación del fenómeno a medir: Etapa donde se determinan los efectos internos y externos provocados por las cargas en la estructura y se definen los puntos y componentes de la estructura donde se medirán estos parámetros.
- Selección de sensores: Etapa donde se debe identificar las condiciones a las cuales se verán afectados los sensores y los sensores a utilizar, de manera de definir un sistema de monitoreo apropiado a las condiciones a largo plazo al cual se podría ver sujeta la estructura.
- Sistema de adquisición de datos: Para la implementación de este sistema, se debe considerar el hardware, software, precisión, velocidad, resolución y el sistema de comunicación entre los diferentes instrumentos.
- Manejo de datos y selección del método de pre-procesamiento de la señal: En esta etapa se realiza una normalización y acondicionamiento de la señal, mediante filtros. Junto con esto, debido a la gran cantidad de datos, se pueden implementar sistemas estadísticos para representar sus resultados.
- Análisis de salud y diagnóstico: Como etapa final, se realiza un análisis de salud de la estructura, donde los daños de mayor envergadura pueden ser detectados por métodos estadísticos, mientras que para una detección temprana de daños se requiere de métodos de procesamiento de datos como el análisis de wavelet, análisis modal, de vibración, entre otros. El diagnóstico apunta a clasificar la ubicación, el tamaño y el tipo de daño. Finalmente, se deben presentar datos de manera tal que sea comprensible y fácil de entender.

En la Tabla 6.1 y 6.2 se presentan los principales parámetros de deterioro y la clasificación de daño de los puentes, según sus elementos, lo cual se debe considerar para definir los parámetros a monitorear con el sistema de SHM.

Tabla 6-1: Parámetros de deterioros según elementos del puente (MOP, 2019)

		PARÁMETRO
SUBESTRUCTURA	Cimentación	Profundidad de socavación
	Estribos	Desplazamiento vertical del estribo
		Inclinación estribo
		Presión del terreno en los muros
		Desplazamiento diferencial entre estribos y aletas laterales
		Presión en el murete de guarda
	Pilas	Desplazamiento vertical pilas
		Inclinación de pila
		Abertura de fisura en la unión de pila y tajamar
		Aberturas de fisura (resto)
SUPERESTRUCTURA	Tablero de vigas	Desplazamientos en elementos del tablero
		Corrosión (Intensidad de corriente eléctrica)
		Abertura de fisuras
	Tablero tipo losa	Pérdida de Recubrimientos
		Abertura de fisuras
	Tableros tipo viga en cajón	Abertura de fisuras

	Tableros metálicos	Acortamiento por pandeo de elementos
		Abertura de fisuras
		Deformaciones excesivas en elementos
		Roturas locales
		Corrosión (Intensidad de corriente)
	Mampostería	Abertura de fisura en arcos y bóvedas
		Formación de rótulas
	Atriantados	Elongación de los cables
		Deterioro de las protecciones de los cables (recubrimientos)
		Tensión en los cables
		Deformaciones excesivas en elementos
	Elementos de unión	Aparatos de apoyo
Desplazamientos y tensiones		
Juntas de movimientos		Desplazamientos en elementos del tablero
		Mal estado de las juntas y/o aparatos de apoyo
Relacionados con equipamiento	Equipamiento, pavimentos y acabados	Mal estado del pavimento
		Desconchamientos de pintura y corrosión en elementos (intensidad de corriente, precipitación, humedad ambiental y temperatura)
		Mal estado de desagüe (precipitación)
		Humedades / eflorescencias / ataque químico (pH)

Tabla 6-2: Clasificación de deterioros según elementos del puente (MOP, 2019).

		DETERIORO		
SUBESTRUCTURA	Cimentación	Descalce de cimentaciones superficiales (zapatas, losas, etc.)		
		Socavación en cimentaciones profundas (pilotadas, pantallas...)		
	Estribos	Asiento vertical del estribo		
		Giro del estribo según eje transversal		
		Giro del estribo según eje longitudinal		
		Empuje excesivo sobre los muros		
		Diferencia de desplazamientos entre estribos y aletas laterales		
		Empuje excesivo sobre el murete de guarda		
	Pilas	Asiento de pilas		
		Giro de pila según eje transversal		
		Giro de pila según eje longitudinal		
		Fisuración en la unión de pila y tajamar		
Fisuración por pandeo				
Fisuración por compresiones excesivas				
Fisuración por cortante				
Fisuración por impacto				
SUPERESTRUCTURA	Tablero de vigas	Deformaciones excesivas en elementos del tablero		
		Daños por corrosión en vigas		
		Fisuras por asiento plástico		
		Fisuras por arrastre de cortante		
		Fisuración por fallo de adherencia anclaje		

Tablero tipo losa	Descascarillamientos
	Fisuras por concentración de tensiones
	Fisuras bajo los alveolos (en vigas aligeradas)
Tableros tipo viga en cajón	Fisuras de cortante por excentricidad de los apoyos respecto a las almas
	Fisuración por contracción térmica diferencial entre losa inferior delgada y almas (más gruesas)
	Fisuras en zonas de anclajes intermedios
Tableros metálicos	Pandeo local
	Pandeo general
	Fisuras de flexión
	Deformaciones excesivas en elementos
	Entallas o roturas locales en uniones
	Ausencia de elementos de unión (pernos, remaches, soldadura...)
	Corrosión
Mampostería	Agrietamiento en arcos y bóvedas
	Formación de rótulas
Atriantados	Pérdida de resistencia de los cables
	Deterioro de las protecciones de los cables (recubrimientos)
	Fatiga
	Variación en la tensión de los cables
	Deformaciones excesivas del tablero

Elementos de unión	Aparatos de apoyo	Corrosión en apoyos metálicos
		Despegue
		Pérdida de posición teórica original
		Exceso de compresión
		Exceso de deformaciones o movimientos / tensiones
	Juntas de dilatación / movimientos	Pátinas
		Rotura/insuficiencia de capacidad de las fijaciones
		Movimiento impedido
		Degradación del material / ausencia de junta
		Falta de estanqueidad
Relacionados con equipamiento	Equipamiento, pavimentos y acabados	Mal estado de las fijaciones o su protección
		Grietas y discontinuidades en pavimentos
		Roderas / Baches / IRI
		Deterioro de barreras y protecciones y señalización (oxidación, pintura, vandalismo...)
		Rotura de barreras
		Obstrucción de desagües
		Humedades / eflorescencias / ataque químico

6.3 Caracterización de una estructura para fines de instrumentación

En esta etapa se debe detallar las dimensiones físicas tanto de la estructura como de sus elementos, junto con la condición actual de la estructura, la cual se puede evaluar mediante inspecciones visuales en conjunto a un modelo computacional para estimar cuales serían los potenciales mecanismos de daños probables de una estructura. Se deben considerar las cargas que se aplican a la estructura (estáticas y dinámicas), identificar los elementos estructurales cargados, los detalles constructivos, los puntos problemáticos y los daños existentes en la estructura. Entre otros aspectos, se debe verificar que elementos podrían ser especialmente susceptibles a efectos ambientales como efectos de corrosión, socavación, humedad, etc.

Es necesario considerar las cargas, deformaciones y desplazamientos que ocurren en la estructura debido a la interacción con sus apoyos o por efectos externos como temperatura, las cuales causan esfuerzos en los componentes estructurales que deben ser considerados en el sistema de SHM. Es necesario conocer las cargas aplicadas a una estructura para evaluar la capacidad de esta, lo que

permite determinar límites de fatiga asociados al tiempo de vida residual de los componentes de una estructura en mal estado y/o identificar cuáles son las deformaciones, desplazamientos o aceleraciones límites que gatillan que la estructura alcance su resistencia admisible en términos de fuerzas o deformaciones de la estructura como un todo o de los componentes estructurales que tienen un rol fundamental en la respuesta estática o dinámica y/o estabilidad del puente.

Las medidas necesarias para la determinación de los efectos de las cargas están ajustadas de acuerdo con las condiciones físicas y de las cargas que han sido adoptadas para el diseño estructural o evaluación. A continuación, se analizan diferentes medidas para sus respectivas cargas:

- Las cargas de peso propio se pueden determinar conociendo la distribución de masa de los pesos propios a lo largo de la estructura.
- Los efectos térmicos requieren conocimiento sobre la distribución de temperatura en la estructura.
- Las fuerzas de restricciones debido a desplazamientos provocados por asentamientos o cambios espaciales en los estribos usualmente son resultados de cargas constantes y variables que ocurren simultáneamente. Para su evaluación se requiere una investigación metrológica (dimensiones) de los respectivos desplazamientos en conjunto con un estudio de mecánica de suelos.
- La resistencia que se desarrolla en la estructura frente a cargas provocadas por viento o agua, causan acciones en la estructura, donde la magnitud de las cargas es función de la energía cinética de los flujos medios (Flow media) y la superficie de transmisión (área de contacto del flujo y la estructura). Para identificar estas acciones, es necesario establecer la distribución de velocidades de flujo (agua o viento).
- Las cargas de tráfico que tienen componentes dinámicas requieren de sistemas de mediciones para determinar sus efectos en la estructura (e.g., carga móvil). Generalmente se miden tensiones y deformaciones de la estructura para comparar resultados. A la vez, es importante conocer el flujo de tráfico, mediante la medición de la velocidad de movimiento y distancia entre vehículos.
- Vibraciones, colisiones, explosiones y cargas sísmicas generan efectos dinámicos correspondientes en magnitud y en propiedades dinámicas con las cargas y la estructura. Para esto, es necesario medir velocidades y/o aceleraciones.

6.4 Selección de sensores

Para realizar un sistema de SHM, es necesario utilizar sensores para medir la respuesta de diversos componentes. Existe una gran diversidad de sensores en el mercado actual para la aplicación en un sistema de monitoreo de puentes. A continuación, se presenta la tabla 3 con las principales características de los sensores más utilizados en aplicaciones reales, junto con una descripción correspondiente.

Tabla 6-3: Selección de Sensores.

Sensor	Acelerómetros	Fibras Ópticas	GPS	Sensor AE	Strain Gauges	Inclinómetros
--------	---------------	----------------	-----	-----------	---------------	---------------

Fenómeno a medir	Aceleración, desplazamiento relativo	Desplazamientos, localización de grietas, esfuerzos, inclinación, temperatura.	Desplazamientos	Emisiones acústicas	Esfuerzos	Inclinaciones
Monitoreo	Global	Global/Local	Global	Local	Global/Local	Global/Local
Instalación	simple	compleja	simple	compleja	simple	Simple
precisión	± 0.001 (g)	esfuerzos: ± 1.2 ($\mu\epsilon$), aceleración 0.1 (g)	H: ± 5 (mm), V: ± 10 (mm)	± 1.5 (dB)	± 1.2 ($\mu\epsilon$)	0.005°
alimentación	DC: 5 (V)	AC/DC	AC/DC	AC/DC	AC/DC	AC/DC
Rango de mediciones	$\pm 1.7, \pm 5, \pm 18$ (g)	esfuerzos: $\pm 2500\mu\epsilon$, aceleraciones: $\pm 10g$	H: ± 3 (mm), V: ± 5 (mm)	-63/80 (dB)	± 1.2 ($\mu\epsilon$)	$\pm 3^\circ$
Limitaciones	Mediciones infructuosas para señales con componentes menores a 0.2 (Hz) (estáticas)	análisis de datos complejo	frecuencias menores a 20 (Hz)	sensible a ruido ambiental	Sensible a cambios de temperatura ambiental	
Requisitos técnicos		Requerimiento de multiplexer	Base de Radio externa	Utilización de varios sensores para identificar fallas		

- Acelerómetros: Instrumento que permite determinar la aceleración que experimentan las estructuras, que sirven para determinar vibraciones de alta frecuencia generadas por cargas ambientales tales como tráfico, viento, sismos, impactos, etc. Estos sensores se suelen utilizar para un monitoreo global de las estructuras, presentándose como el método convencional para estudios dinámicos o monitoreo de gran escala. Es necesario considerar que el acelerómetro empleado en sistemas de SHM debe presentar un rango de medición máximo mayor al máximo valor de amplitud que puedan ocurrir debido a las vibraciones extraordinarias (como sismos) a las cuales se verá sujeta la estructura durante la vida útil de la estructura o del sistema de SHM. De igual forma se requiere que su rango dinámico sea alto y su nivel de ruido basal sea bajo de manera de analizar la estructura ante acciones ambientales, a la vez, se recomienda el uso de acelerómetros de baja sensibilidad para vibraciones de alta amplitud, mientras que para vibraciones de baja amplitud se recomiendan acelerómetros de alta sensibilidad.
- Fibra óptica: Instrumento que corresponde a una hebra delgada de material dieléctrico capaz de conducir y transmitir impulsos luminosos, los cuales sirven de indicadores para sistemas de monitoreo global y local de esfuerzos o desplazamientos, aceleraciones,

temperatura e inclinación. Existen diferentes tipos de fibras ópticas como las fibras OTDR (Optical Time-Domain Reflectometry) las cuales permiten determinar desplazamientos y detección de grietas de manera local, y las fibras FBG (Fibras Bragg Grating) que son las más versátiles, capaces de medir deformaciones, esfuerzos, variaciones térmicas e inclinación de manera local y global en la estructura (empleando instrumentos discretos y complementarios). Las fibras ópticas se destacan debido a su estabilidad, sensibilidad adecuada, insensibilidad a pulsos magnéticos y capacidad de medir varios puntos a la vez.

- GPS: Sistema que permite conocer los desplazamientos absolutos de la estructura, capaz de obtener las propiedades dinámicas de los puentes, como frecuencia natural y formas modales, es decir, aplicable para monitoreo global de la estructura. Este sistema es una forma apropiada para monitorear grandes deflexiones en las estructuras con bajas frecuencias de vibrar. Cabe mencionar que el uso de GPS requiere del uso de varios puntos de medición en un puente de manera de poder determinar las deformaciones relativas de la estructura.
- Sensores de emisiones acústicas: Sensores capaces de detectar ráfagas de energía llamadas emisiones acústicas, las cuales son provocadas por un emisor y que son consecuentemente detectadas por varios sensores receptores en la estructura. Cambios en los patrones de las escalas de amplitud y tiempo de las ondas emitidas y recepcionadas pueden ser asociadas a daños locales. Estos sensores son útiles para monitoreo local de un puente, es decir, para detección de daños locales como la formación y crecimiento de grietas o daños en las barras pretensadas.
- Galgas extensiométricas (Strain gauges): Instrumento utilizado para la medición de deformaciones unitarias en el elemento y punto al cual está adherido, el cual puede ser implementado en sistemas de monitoreo global y local.
- Inclinómetros: Instrumento que permite monitorear los movimientos y rotaciones estructurales de hasta 0.005° , permitiendo medir la inclinación de un puente bajo condiciones de tráfico normales. Estos sensores son altamente sensibles y de fácil instalación.

Tecnologías MEMS (Micro Electro Mechanical System) pueden ser aplicadas para considerar diversos sensores de monitoreo simultáneamente como los acelerómetros, inclinómetros y galgas extensiométricas, entre otros, lo que genera sensores de menor tamaño y con menor demanda de energía, lo que facilita su instalación, manejo y mantención.

6.5 Posicionamiento óptimo de sensores

Es necesario considerar el posicionamiento de los sensores dentro del SHM debido a que una correcta localización de los sensores permite obtener la información adecuada para conocer el comportamiento de la estructura. Existen diferentes métodos para estimar los parámetros modales basados en la respuesta vibratoria de la estructura, los cuales buscan optimizar la cantidad de sensores requerida junto con su posicionamiento adecuado, los métodos se mencionan a continuación:

- Método EI: El método de influencia efectiva (Effective Influence) es uno de los métodos más utilizados en técnicas de ensayos dinámicos y actualización de modelos estructurales, junto con el posicionamiento adecuado de n sensores en una estructura. El método se basa en determinar un índice de influencia efectiva (EI) para cada posición de los sensores, el cual representa la contribución respectiva de cada sensor para la identificación de las formas modales (Kammer, 1992).
- Método EI-DPR: El coeficiente DPR (Driving Point Residue) se incorporó al método de influencia efectiva para evitar la selección de ubicación de sensores donde se presenta una baja energía, la cual corresponde a uno de los limitantes del método previo (BinBin, et al., 2011).
- Método KE: El método de energía cinética (Kinetic Energy) es un método similar al de influencia efectiva, pero considera la distribución de masa del sistema para el análisis (Chan, et al., 2006).

6.6 Sistema de adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos se encarga del proceso donde la información obtenida por los sensores es acondicionada, recolectada, digitalizada y transmitida para un análisis profundo e interpretación, facilitando el flujo de información desde la red de sensores hasta el computador. Existen dos técnicas que se destacan para el monitoreo estructural: “data logging” y “decentralized data aggregation”.

En “data logger” se utilizan instrumentos que demodulan la señal de varios sensores, recolectan la información, la condicionan, digitalizan y almacenan. En este proceso, los datos son adquiridos localmente por los sensores en los nodos, para luego enviarla individualmente a la estación base, donde se puede analizar junto con el historial de tiempo de cada medida. Este método utiliza de mejor manera la transmisión de banda ancha, pero el tiempo de procesamiento puede ser significativamente mayor.

En el segundo método, que corresponde a una adquisición de data en tiempo real, los datos de cada sensor se adquieren y se procesan localmente, usualmente en nodos encargados de un vecindario de sensores, para luego reenviar la información procesada a un módulo de salida. Este método reduce la demanda de poder al disminuir el tamaño de información transmitida, pero no permite un historial completo de tiempo. Este sistema permite acceder a los datos entre los intervalos de muestreo, mientras que otros métodos presentan un retraso debido a que deben terminar todos los intervalos antes que la información esté disponible.

Para la definición del sistema de adquisición de datos, es necesario considerar los siguientes aspectos:

- Arquitectura: La arquitectura de un sistema de adquisición de datos debe considerar nodos de sensores que sean capaces de obtener información desde la estructura, el conversor análogo-digital dentro del propio modulo, la transmisión a la estación base, donde la

información puede ser almacenada temporalmente y tratada para ser enviada a un servidor base que efectúa el análisis profundo de los datos.

- Conversión análogo-digital: Para la obtención de la información de los sensores análogos es necesario implementar un instrumento que sea capaz de transformar los datos análogos en digitales para que puedan ser posteriormente procesados en las siguientes etapas del monitoreo.
- Alimentación de poder: El sistema de obtención de datos, tanto los sensores como los módulos de transmisión, deben tener un sistema de alimentación de poder por cable o mediante baterías, donde los sistemas conectados presentan un mayor costo y tiempo de instalación, mientras que los sistemas inalámbricos dependen directamente de la duración de las baterías. Cabe mencionar que para implementar un sistema de SHM se debe tener una fuente de energía a largo plazo por cuanto se requiere de una conexión directa con el sistema eléctrico (reforzado por baterías y UPH en cortes de luz) y/o ser alimentados por fuentes de energías instaladas en la estructura o en sus cercanías como lo son los paneles solares o los sistemas eólicos.
- Implementación de red de sensores inalámbricos: La implementación de un sistema inalámbrico de SHM debe considerar una limitación en el tamaño de señal transmitida por cada sensor, junto con la cantidad de canales a utilizar para facilitar el proceso de adquisición de datos. Las ventajas de un sistema inalámbrico se encuentran en la facilidad de instalación, la posibilidad de aumentar la cantidad de sensores a utilizar en una estructura, un menor mantenimiento, permite una distribución del procesamiento e interpretación de los datos a lo largo de los nodos de la red y se pueden presentar fallas locales sin necesariamente afectar a otros nodos. Como desventaja se destaca su vida útil, que está limitada por la duración de la batería. Se recomienda la utilización de la familia de normas inalámbricas IEEE 802.11 (IEEE , 2009), correspondientes a las normas implementadas por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, junto con esto, existen protocolos de conexiones inalámbricas como ZigBee y protocolos de recolección de data, sincronización de nodos y transferencia de la información como TinyOS.
- Sistemas de monitoreos conectados: Los cuales implican un tiempo de instalación que para situaciones de monitoreo a largo plazo de una estructura son marginales, que corresponde al sistema más confiable y más utilizado a lo largo de la historia de la instrumentación de puentes, pero requiere de una fuente de alimentación de poder en la estructura.
- Sistema de transferencia de datos: la transferencia de datos se puede implementar mediante una red área local (LAN) como Wi-Fi, regido por las normas IEEE 802.11, utilizando frecuencias entre 2,4 GHz y 5 GHz, y mediante una red de celular de área extensa (WAN), adicionalmente existen opciones satelitales o de radiofrecuencia.

6.7 Manejo de Datos y Procesamiento de Datos

Los datos se miden mediante señales analógicas, donde ocurre una conversión a datos digitales, la cual debe ser comúnmente filtrada y acondicionada. Se pueden desarrollar las siguientes tareas (SAMCO, 2006):

- Filtro pasa altos y bajos: para filtrar ruido y efectos de variaciones de temperatura, entre otros.
- Filtro pasa banda: para filtrar frecuencias sensibles para la estructura.
- Integración: para convertir señales de aceleración en velocidad y desplazamiento.
- Generador de parámetros: cálculo de promedio, desviación estándar y valores máximos, entre otros.
- Análisis de frecuencias: determina el contenido espectral de la señal de respuesta en el tiempo.

6.8 Métodos dinámicos para el análisis de salud y diagnóstico de la estructura

Los métodos de análisis de datos corresponden al último proceso de un sistema de SHM y permiten obtener el estado de la salud estructural de un puente. En esta etapa se analizan los datos ya filtrados pudiendo efectuar, dependiendo del nivel de complejidad del SHM, la detección de daño y la localización de este en una estructura.

Los métodos dinámicos se basan en el principio que el daño provoca cambios en las propiedades físicas de la estructura (masa, rigidez y amortiguamiento), los cuales generan cambios detectables en las propiedades modales de la estructura. Estos métodos pueden depender de un modelo numérico calibrado de la estructura, como también puede que se basen en resultados que se obtengan exclusivamente de los datos recopilados por los sensores.

Las características dinámicas que se establecen mediante el monitoreo de vibraciones corresponden a propiedades globales de la estructura, que suelen ser poco sensibles a daños locales. Por esta razón, los daños locales pueden ser obviados a menos que sean severos. Las vibraciones globales suelen estar más afectadas por daños y/o efectos globales, incluyendo efectos ambientales como cambios de temperatura, humedad o variaciones de masa (e.g., tráfico vehicular en el caso de puentes).

Los métodos utilizados para obtener información sobre la condición de una estructura por mediciones en las propiedades de vibración incluyen:

6.8.1 Métodos basados en la frecuencia natural

Este método utiliza las frecuencias naturales de la estructura como base para la determinación de daño, ya que la frecuencia natural puede ser determinada mediante la medición de algunos puntos característicos de la estructura y usualmente están menos contaminados por ruido experimental (Wei & Pizhohg, 2013). Existen diferentes revisiones del uso del cambio de la frecuencia natural

en la identificación de daño, como se muestra en (Salawu, 1997). El método se basa en que cualquier daño generado en una estructura se asocia directamente con una reducción de la rigidez de la estructura, lo que implica reducciones anormales de las frecuencias naturales y es por esto que representa uno de los parámetros más utilizados en la detección de daños (Magalhaes, et al., 2012).

El proceso consiste en calcular la disminución de la frecuencia para un cierto tipo de daño conocido que se modela matemáticamente y se comparan las frecuencias medidas con las frecuencias calculadas, donde se requiere de modelos computacionales para calcular las frecuencias de los diferentes modos de vibración, tanto para el estado no dañado como para los diferentes escenarios de daño planteados (Paredes, 2013).

Como principal ventaja de este método se puede mencionar que las frecuencias naturales de una estructura son relativamente fáciles de medir; sin embargo, aunque es posible detectar la existencia de daño, la localización de daños se complejiza debido a que dos daños localizados en distintos sitios de la estructura puede ocasionar el mismo decremento en la frecuencia natural, que un único daño localizado en un solo sitio de la estructura (Paredes, 2013). Es necesario mencionar que daños estructurales o globales que generen cambios menores al 1% de la frecuencia natural son prácticamente imperceptibles si solo se utiliza un análisis de frecuencias.

Una de las limitaciones de estos métodos es la dependencia del modelo estructural donde se incluyan los daños, junto con esto, el rango de los modos de vibración que es aplicable para la detección de daños corresponde solo a los primeros modos de vibrar (Wei & Pizhohg, 2013). Otra limitación corresponde a que los cambios en la frecuencia provocados por daño en la estructura suelen ser pequeños y pueden pasar desapercibidos como ruido ambiental. Finalmente, la frecuencia natural de una estructura se ve influenciada por efectos ambientales como temperatura, humedad o viento, por lo cual es necesario aplicar métodos para eliminar estos efectos presentados en (Deraemaeker, et al., 2008), (Magalhaes, 2010).

6.8.2 Métodos basados en la forma modal

Los métodos dinámicos funcionan en base a señales obtenidas de sensores dentro de la estructura y el desarrollo de un modelo estructural preciso (e.g., modelo de elementos finitos), permite definir formas modales teóricas (Reda Taha, et al., 2014).

Es necesario mencionar que las formas modales contienen información local de la estructura, lo que los hace más sensibles a detectar múltiples daños en la estructura, además las formas modales son menos sensibles a efectos provocados por ruido ambiental (Wei & Pizhohg, 2013).

Durante la historia del SHM se han utilizado dos métodos de detección de daños en base a la forma modal de la estructura, el método tradicional y el método moderno. El método tradicional intenta establecer una relación entre la detección y localización de daños con un modelo computacional de la estructura, por ejemplo, un modelo de elementos finitos, por lo cual, dependen de información de la estructura no dañada y con daños. Por otra parte, el método moderno se puede aplicar directamente a los datos obtenidos de estructuras dañadas, donde detectan el daño en la estructura

mediante la localización de discontinuidad en la forma modal de la estructura, que es provocado por el daño correspondiente (Wei & Pizhohg, 2013).

Entre los métodos modernos se puede destacar la utilización del método de dimensión fractal (FD), el cual propone un algoritmo de detección de daño usando el FD de la estructura. La ubicación del daño y su tamaño se puede determinar mediante un peak en la curva de FD, la cual indica la irregularidad local de la forma modal, generada por daño (Wei & Pizhohg, 2013).

Como desventaja se puede mencionar que para detectar la forma modal de una estructura, es necesaria la implementación de un sistema más amplio de sensores en el puente, junto con que la detección de daño en el método tradicional solo sirve de forma preliminar y debe ser justificado mediante otros métodos como el análisis de la frecuencia natural (Wei & Pizhohg, 2013).

6.8.3 Métodos basados en emisiones acústicas

El método de emisiones acústicas se basa en la detección del movimiento dinámico en la superficie de una estructura, las cuales se generan por ondas elásticas de tensiones que son generadas por la liberación espontánea de energía elástica acumulada de fallas en elementos de la estructura (Czichos, 2013).

Este método monitorea la respuesta dinámica del material frente a cargas aplicadas o ambientales, de una manera pasiva, permitiendo la detección de fuentes activas y procesos de degradación que evolucionan con el tiempo. Se puede aplicar como monitoreo local, para detección de grietas, corrosión, entre otros, o para un monitoreo global de la estructura, siendo capaz de detectar defectos crecientes (Czichos, 2013).

Para analizar las emisiones acústicas se requiere de sensores piezoeléctricos de recepción acústicas, los cuales deben ser colocados estratégicamente en la estructura. Estos sensores convierten las ondas sonoras en una señal eléctrica para luego ser procesada por métodos computacionales (Yapar, et al., 2015).

Para la detección de mecanismos que provocan emisiones acústicas dentro de la estructura existen métodos de clasificación e identificación como el análisis de amplitud de peak de la señal, la energía y duración de la señal y los métodos avanzados como la aplicación de la FFT (Fast Fourier Transform), análisis de la onda modal o reconocimiento estadístico de patrones mediante emisiones como se muestra en (Miller & Hill, 2005), (Ono, 2007).

6.8.4 Métodos basados en la Transformada de Fourier

La transformada de Fourier es una herramienta matemática que permite obtener, a partir de una función continua en el tiempo, otra función continua, que contiene toda la información de la primera, pero en el dominio de la frecuencia. La función se denomina espectro de Fourier y representa la manera como la medida de amplitud relativa de la señal se distribuye con la frecuencia (Viviescas, et al., 2017). Debido a que los elementos de procesamiento digitales trabajan de forma

discreta, se utiliza la transformada discreta de Fourier (DFT), que consiste en un muestreo uniforme en la frecuencia de la transformada de Fourier.

La DFT permite transformar una función en tiempo discreto, en otra función en el dominio de la frecuencia discreta. Es importante tener en cuenta que para aplicar la DFT, se debe definir la frecuencia a la cual se muestrea la señal continua y el número de muestras de la señal en el tiempo para obtener una resolución en frecuencia adecuada (Arias, 2015).

Otro método que se basa en la transformada de Fourier corresponde a la transformada rápida de Fourier (FFT), la cual corresponde a una de las más utilizadas en SHM debido a que se puede implementar rápidamente y es considerada una técnica eficiente para analizar señal. La FFT convierte muestras discretas de una señal continua en una representación en el dominio de la frecuencia. Como desventaja se puede mencionar que presenta problemas en situaciones donde la estructura se ve afectada por excitaciones dinámicas, debido a que la señal de monitoreo de la estructura excitada presenta una señal no lineal que no puede ser modelada en FFT (Amezquita & Adeli, 2014). Se presentan aplicaciones de FFT para análisis de señales de monitoreo de puentes en (Brincker, et al., 2001), (Lee, 2007), (Hu, et al., 2013).

6.8.5 Métodos basados en la transformada de Wavelet

La transformada de Wavelet corresponde a una técnica de procesamiento de señales que ha sido capaz de superar las principales limitaciones de la Transformada de Fourier, como indicar el tiempo de ocurrencia de una señal transiente, ya que la transformada de Fourier solo se basa en información de la frecuencia de la señal. La transformada de Wavelet tiene la habilidad de entregar información de tiempo y frecuencia de una señal de manera precisa (Reda Taha, et al., 2006).

El análisis de wavelet básicamente consiste en tomar la función wavelet, comparándola con la señal original, hallando correlación entre ambas. La función wavelet, se escala y se vuelve a comparar con la señal original, donde el escalado corresponde a una compresión o estiramiento de la función wavelet, afectando la pseudo-frecuencia de la misma. Teniendo entonces la pseudo-frecuencia de la función wavelet para cada escala, se puede identificar las frecuencias características de la señal, buscando coeficientes de correlación alto (Tischer, et al., 2007).

Existen diferentes métodos que aplican la transformada de Wavelet en la detección de daños, a continuación, se presentan 3 métodos con aplicaciones reales mayor detalle en (García, 2016).

- Método basado en la transformada continua de wavelet (CWT): La CWT sirve de base para un procedimiento de detección de daño basado en la premisa que el daño debido a una pérdida repentina de rigidez puede ser detectada mediante formas modales con coeficientes wavelet que desarrollan grandes amplitudes en la localización del daño (Lazcano, et al., 2011).
- Método del análisis discreto de Wavelet (DWA): El procedimiento de detección de daño DWA consiste en seleccionar una wavelet adecuada y en base a ella aplicar el algoritmo Transformada Rápida Wavelet (FWT por sus siglas en inglés) a una señal en función del

espacio (forma modal) para encontrar un árbol de descomposición wavelet de la señal (Lazcano, et al., 2011).

- Método basado en paquetes de Wavelets (WPS): Este método está basado en la Transformada Wavelet por paquetes para la localización del daño en estructuras. En dicho método, denominado Método Basado En Paquetes Wavelets (WPS, por sus siglas en inglés), es requerida la respuesta dinámica de la estructura para las condiciones exentas del daño y el estado actual (Lazcano, et al., 2011).

6.8.6 Métodos basados en estudio estadísticos

Los modelos estadísticos son utilizados para desarrollar modelos matemáticos basados en los datos obtenidos, estos se dividen en lineales y no lineales, donde los modelos lineales corresponden a los modelos más utilizados en SHM para el procesamiento y evaluación de la estructura bajo cargas dinámicas, debido a que pueden ser implementadas fácilmente y se consideran una técnica eficiente. Entre los modelos lineales más frecuentes se puede encontrar modelos como el modelo autorregresivo (AR), promedio móvil (Moving-Average, MA) y el promedio autorregresivo móvil (ARMA), entre otros (Amezquita & Adeli, 2014). Se puede analizar aplicaciones de métodos estadísticos en (Carden, 2008) y (Nair & Kiremidjian, 2006).

Como ventaja se puede mencionar que los métodos estadísticos son fáciles de implementar y existe una diversidad de modelos que se pueden implementar para SHM. Como desventaja se puede mencionar que los métodos estadísticos pueden ser sensibles al ruido ambiental (Amezquita & Adeli, 2014).

Entre los métodos estadísticos también se presentan los métodos de detección de daños basados en momentos estadísticos (SMBDD por sus siglas en inglés), a continuación, se presentan dos casos donde se aplican estos métodos (García, 2016).

- SMBDD en el dominio de la frecuencia: El principio básico del método de SMBDD es identificar los parámetros de rigidez de una estructura antes y después de la ocurrencia de daño a través de una actualización del modelo de elementos finitos (FE) que usa los momentos estadísticos totalmente o, muy probablemente, las respuestas estructurales parcialmente medidas y entonces determina las localizaciones del daño y sus severidades comparando los parámetros de rigidez estructurales identificados en las dos fases (Xu, et al., 2011).
- SMBDD en el dominio del tiempo: en términos teóricos, el método de SMBDD puede aplicarse a las estructuras en el dominio de frecuencia solo cuando las excitaciones externas obedecen las distribuciones Gaussianas. Este requisito limita la aplicación del método de SMBDD a las excitaciones externas no-Gaussianas. En esto aspecto, el método de SMBDD ha sido extendido y se ha llevado a cabo en el dominio del tiempo para las excitaciones externas no-Gaussianas y no-estacionarias con la consideración de medidas incompletas (Xu, et al., 2011). Estos métodos no necesitan disponer de un modelo matemático detallado de la estructura para detectar el daño o conocer el estado de la estructura previo al daño (Lazcano, et al., 2011).

6.9 Definición de alarmas

Se pueden establecer diferentes categorías para la definición de alarmas o límites que permitan informar situaciones anormales, los cuales se presentan a continuación:

- Límites normales de operación: En esta categoría se obtienen límites considerando valores estadísticos de parámetros estructurales a partir de los datos registrados por el monitoreo continuo bajo condiciones de operación normal. Como ejemplo se describe una metodología correspondiente:
 1. Extraer valores crudos registrados por sensores.
 2. Calcular el valor de la media representante de n minutos de adquisición.
 3. Unir los valores de las medias obtenidas en un vector que constituya m días de adquisición.
 4. Ajustar distribución estadística de las medias obtenidas.
 5. Obtener distribución estadística que represente el comportamiento de cada sensor.
 6. Definir cantidad y rangos de los límites.
- Límite de diseño: Los cuales se basan en los valores máximos de los parámetros estructurales proyectados por el diseñador, obtenidos mediante códigos y normas.
- Límite de resistencia de materiales: Representando el mayor grado de daño que puede sufrir los elementos estructurales críticos, aquellos más susceptibles a la falla. Se basa en las capacidades físicas de los materiales empleados en la estructura, usualmente expresado como porcentaje de fluencia o resistencia última de los elementos estructurales críticos.
- Límites basados en Simulación Montecarlo: Cuando no se tiene información dada por alguna instrumentación de la estructura, esta aproximación se basa en datos estadísticos de cargas dinámicas a la que estructura está expuesta, mediante un modelo de elementos finitos.

7. Análisis de Resultados y Conclusiones

7.1 Análisis de Resultados

La presente memoria realizó una primera aproximación de una guía de recomendaciones para la aplicación de sistemas de monitoreo de la salud estructural en puentes viales chilenos. Para llevarla a cabo, se indagó mediante una investigación bibliográfica de normas, documentos técnicos, tesis e informes que mencionan procedimientos, aplicaciones y limitaciones de sistemas de monitoreo estructural, considerando situaciones prácticas y teóricas.

Como base de investigación, se consideró un diseño genérico mencionado por los documentos bibliográficos estudiados, los cuales dividen los sistemas de monitoreo de forma similar, en función de los principales desafíos y etapas que se enfrentan al momento de implementar un SHM en puentes. Todos los documentos, consideran como primera etapa la caracterización de la estructura, seguida por un estudio de los sensores, el sistema de adquisición de datos y el post-procesamiento de los datos necesario para obtener la salud actual de la estructura. Junto con esto, se observa un consenso en la definición de dos aproximaciones de monitoreo, correspondientes al monitoreo local y global, los cuales se pueden implementar en conjunto, pero de acuerdo con lo observado en el estudio bibliográfico, en la mayoría de los casos el monitoreo global es predominante para conocer el estado efectivo del puente y el monitoreo local cumple un rol secundario, debido a que el monitoreo local solo permite el conocimiento del desarrollo de daños o comportamientos locales de algunos componentes, en donde se debe conocer su ubicación y no permiten conocer el estado global de la estructura.

El uso de sensores a lo largo de los diferentes métodos de monitoreo se basa principalmente en acelerómetros, los cuales permiten conocer el comportamiento vibratorio de la estructura. Junto con estos, se destacan la fibra óptica, que es capaz de medir diferentes fenómenos de manera distribuida, las galgas extensiométricas para determinar los esfuerzos, los sistemas GPS para detectar el movimiento de la estructura y los inclinómetros.

El estudio estadístico de la tipología de puentes del país permite definir una estructura tipo que representa sobre el 60% de las estructuras pertenecientes a la red vial crítica del país, la ruta 5. Esta tipología se define como un puente de hormigón armado pretensado de 76 m con dos vanos. Junto con esto, se presentan tablas que mencionan los principales tipos de daños y parámetros que caracterizan daños considerados por el MOP, lo que permite estimar cuales deben ser los parámetros por considerar en la instrumentación de la estructura.

Los desafíos que se destacan en los sistemas de monitoreo corresponden a la alimentación de poder, tanto para los sistemas conectados que requieren de una fuente de energía en la estructura y un sistema de conexión más complejo o para los sistemas inalámbricos que son dependientes de su batería, pero se ha demostrado que los sensores con tecnología MEMS son capaces de durar más de un año sin la necesidad de cambiar las baterías, lo cual se puede considerar un período razonable para la mantención correspondiente.

Otro desafío corresponde a la transferencia de información desde el sistema de adquisición de datos hasta la estación base, debido a la gran cantidad de datos que puede generar el sistema de monitoreo. Para esto, se presentan dos tecnologías complementarias, Wi-Fi y redes de celulares, las cuales permiten una transferencia de datos local y extensa.

Cabe mencionar que la bibliografía en general considera que la funcionalidad de un sistema de monitoreo estructural está más relacionada con la aplicación de un análisis de datos que con la cantidad de datos obtenidos de la estructura. Es decir, se recomienda enfocar el esfuerzo del monitoreo en un análisis más profundo de los datos obtenidos por los sensores que en la instrumentación mediante una mayor cantidad de sensores. Sin embargo, sin sensores no se puede obtener información cuantificable de la estructura y sin análisis de la información no se puede conocer el estado real de la estructura, por lo cual es necesario alcanzar un equilibrio de cantidad de sensores y profundidad del análisis.

Diferentes aplicaciones de sistemas de monitoreo estructural han sido capaces de determinar el estado de una estructura sin la necesidad de un monitoreo continuo en tiempo real, lo que lleva al análisis de la necesidad de un monitoreo continuo en tiempo real, considerando que se pueden implementar monitoreos continuos que determinen el estado de una estructura en intervalos de tiempo definidos, evitando una sobre acumulación de datos y disminuyendo la demanda de energía de estos.

Uno de los puntos a considerar es la dependencia de un modelo computacional que requieren algunos de los métodos de análisis de datos. El desarrollo de estos modelos implica un esfuerzo de parte de un equipo de ingenieros, lo cual dificulta la implementación de un monitoreo para un proyecto para monitorear varios puentes a la vez o con menor presupuesto.

Al analizar el documento de inspección de puentes del MOP se observa que, debido a la variedad de estados, situaciones y acciones sobre un puente, el método de inspección actual es capaz de detectar situaciones de daño mediante inspección visual, por lo que un sistema de monitoreo es capaz de complementar este método e incluso detectar daños que no se pueden observar en una inspección visual.

Debido a la extensa variedad de sensores, métodos, técnicas y desafíos que existen en las aplicaciones de monitoreo estructural, resulta complejo definir un solo método de monitoreo para todas las estructuras del país, por lo cual el estudio realizado se centró en un estado del arte del monitoreo estructural.

El estudio realizado, se ha centrado en la búsqueda exploratoria de información para generar un documento técnico que permita simplificar el diseño de un sistema de monitoreo para puentes, presentando información y recomendaciones para implementar un monitoreo estructural, considerando desde el conocimiento previo necesario para definir daños probables, puntos de interés y medidas para determinar los efectos de las cargas aplicadas al puente, hasta que tipos de sensores, como posicionarlos, y un detalle de los métodos utilizados en la actualidad para los sistemas de adquisición de datos y análisis de estos. Este documento final permite comprender los desafíos y diferentes alcances de un monitoreo, entregando técnicas, métodos y procedimientos para la implementación de un SHM en puentes.

7.2 Conclusiones

Los puentes son elementos fundamentales en la infraestructura de transporte de la cual la sociedad depende hoy en día, donde la operación y el mantenimiento se han vuelto más complejo con el tiempo. Un sistema de monitoreo estructural permitiría conocer el estado actual de un puente, facilitando el trabajo de mantenimiento y aumentar la eficiencia económica al ser capaz de prevenir la propagación de daños para actuar oportunamente.

En el estudio bibliográfico llevado a cabo se ha buscado la estandarización de un sistema de monitoreo aplicable a los puentes chilenos, que permita conocer el comportamiento de las estructuras a lo largo de su vida útil. Esta información permite determinar la necesidad de actuar en el caso de comportamientos anormales o fallas en la estructura, para prevenir el crecimiento de las fallas o en casos extremos el colapso del puente. A continuación, se mencionan las conclusiones obtenidas tras el desarrollo de esta memoria:

1. Las recomendaciones para desarrollar un sistema de SHM ha sido desarrollada en un documento técnico simple que describe someramente algunas etapas, métodos, protocolos e instrumentos utilizados. En este contexto el documento presentado se presenta como una versión muy simplificada y como una primera aproximación de generar un documento que facilite la implementación de SHM en puentes.
2. El monitoreo considera etapas como caracterización de la estructura a monitorear, la identificación del fenómeno a medir, la selección de sensores, el sistema de adquisición de datos, el manejo de los datos y el análisis de la salud estructural mediante métodos dinámicos.
3. El estudio de los sensores define los principales instrumentos que permiten conocer el comportamiento de los puentes mediante los parámetros de aceleración, esfuerzos, inclinación y desplazamientos. Estos sensores son los acelerómetros, las fibras ópticas, los sistemas GPS, los sensores de emisiones acústicas, las galgas extensiométricas y los inclinómetros.
4. La definición de límites en las mediciones de los sensores se presenta como un indicador de situaciones anormales en la estructura que requieren atención. Estos límites se deben basar en valores estadísticos, valores basados en la modelación numérica de la estructura, por la resistencia de los materiales o la simulación de Montecarlo.
5. Como desafíos para la implementación de un sistema de monitoreo se presenta la alimentación de poder de la estructura, ya sea tanto para sistemas conectados o inalámbricos, el posicionamiento óptimo de los sensores, la transferencia de datos desde la estructura a una estación base y la dependencia de un modelo computacional de algunos métodos de análisis.
6. La selección de un sistema conectado o inalámbrico va a depender de la situación a la que se presentará el sistema de monitoreo, en donde se considera un sistema conectado para proyectos de monitoreo a largo plazo, donde la instalación del sistema represente un período de tiempo marginal, y donde se pueda implementar un sistema de energía capaz de alimentar a los instrumentos en la estructura, mientras que un sistema inalámbrico tendrá preferencia cuando no se pueda obtener energía para alimentar el sistema de monitoreo, para monitoreos de períodos más cortos o por facilidad de instalación.

7. La calidad de un sistema de monitoreo se basa tanto en la cantidad de información que se puede obtener de la estructura como del análisis de los datos, donde ambas acciones son complementarias.
8. El sistema de monitoreo estructural se presenta como una herramienta complementaria a las inspecciones periódicas estipuladas por el MOP para verificar el estado de un puente.
9. Debido a la diversidad de métodos, sensores y estructuras es inviable el desarrollo de un solo método de monitoreo para todas las estructuras, por lo cual la estandarización del documento técnico se centra en la recomendación de técnicas e instrumentos para implementar un SHM.
10. La implementación de sistemas de monitoreo en tiempo real presenta una gran variedad de dificultades y es demandante de tiempo, por lo cual puede resultar económicamente inviable para proyectos con menor presupuesto. Para estos casos, se pueden implementar sistemas de monitoreo periódicos que implican menores gastos y tiempo.
11. Los sistemas de monitoreo de la salud estructural de puentes siguen siendo un campo en desarrollo que presenta una gran cantidad de áreas de investigación, por lo cual no se pudo abarcar por completo todo el espectro de métodos, técnicas, sensores y protocolos existentes en esta memoria.

7.3 Recomendaciones a trabajo futuro

Existen diversos métodos y sensores que no se mencionaron en el desarrollo de esta memoria, los cuales quedan propuestos a investigación, como la aplicación de programas de inteligencia artificial y redes neuronales para el análisis de los datos obtenidos de la estructura, las cuales facilitan la detección y estimación de daño y propagación. Otro método computacional que se puede implementar en el monitoreo estructural corresponde al BigData, que permite un mejor manejo y análisis de la basta cantidad de data que se puede obtener de un SHM. La implementación de redes colaborativas en una red inalámbrica de sensores permite que los módulos de sensores se comuniquen y cooperen entre sí, pudiendo disminuir la demanda de energía y aumentar la capacidad de computo.

8. Bibliografía

Ahlborn, T. M. e. a., 2010. *The State -of-the-Practice of Modern Structural Helth Monitoring for Bridges: A Comprehensive Review*, s.l.: Michigan Tech.

America Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO, 2017. *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, s.l.: s.n.

American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO, 2003. *Guide manual for condition evaluation and load and resistance factor*, s.l.: s.n.

Amezquita, J. P. & Adeli, H., 2014. *Signal Processing Techniques for Vibration-Based Health Monitoring of Smart Structures*, s.l.: s.n.

Arias, Y., 2015. *Sistema de Tiempo Real para el Análisis de Vibración en Puentes*, s.l.: s.n.

Barrias, A., Casa, J. & Villalba, S., 2016. *A Review of Distributed Optical Fiber Sensor for Civil Engineering Applications*, s.l.: s.n.

BinBin, L., DongSheng, L., XueFeng, Z. & JinPing, O., 2011. *Optimal sensor placement in health monitoring of suspension bridge*, s.l.: s.n.

Brincker , R., Zhang, L. & Andersen , P., 2001. *Modal identification of output-only system using frequency domain decomposition.*, s.l.: s.n.

Buckle, I. y otros, 2012. Structural Performance of Bridges in the Offshore Maule Earthquake of 27 February 2010. En: *Earthquake Spectra*. s.l.:Earthquake Engineering Research Institute, pp. 533-552.

Carden, P., 2008. *ARMA modelled time series classification for structural health monitoring*, s.l.: s.n.

Casas, J. & Cruz, P., 2003. *Fiber Optic Sensor for Bridge Monitoring*, s.l.: s.n.

Catteneo, C., 2009. *Análisis de Deformaciones en nudos Compuestos en Edificios de Oficinas*, s.l.: s.n.

Chang, M. & Pakzad, S., 2014. *Optimal Sensor Placement for Modal Identification of Bridge System Considering Number of Sensing Nodes*, s.l.: s.n.

Chan, T., Liu, S., Yu, L. & Tam, H., 2006. *Fiber Bragg grating sensors for structural health monitoring of Tsing Ma bridge: Background and experimental observation*, s.l.: s.n.

Czichos, H., 2013. *Handbook of Technclal Diagnostics*. s.l.:Springer.

Czichos, H., 2013. *Handbook of Technical Diagnostics*. s.l.:s.n.

Deraemaeker, A., Reynders, E. & De Roeck, G., 2008. *Vibration-based structural health monitoring using output-only measurements under changing environment*, s.l.: s.n.

Dong, Y., Song, R. & Liu, H., 2010. *Bridges Structural Health Monitoring and Deterioration Detection Synthesis of Knowledge and Technology*, s.l.: s.n.

Emin, a., Necati, F., Grimmelsman, A. & Pervizpour, M., 2003. *Development of a Model Health Monitoring Guide for Major Bridges*, s.l.: s.n.

Enckell, M., 2011. *Lesson Learned in Structural Health Monitoring of Bridges Using Advanced Sensor Technology*, s.l.: KTH Architecture and the Built Environment.

Fan, W. a. Q. P., 2013. *Vibration-based Damage Identification Methods: A Review and Comparative Study*, s.l.: s.n.

García, I., 2016. *Métodos para la detección, localización y evaluación de daños en estructuras de puentes a partir de parámetros modales*, s.l.: s.n.

Gomez, J., 2010. *Estudio, Validación y Aplicaciones de Acelerómetro Triaxial para Mediciones de Vibraciones en Estructuras*, s.l.: s.n.

Hernández, C., 2016. *Prototipo para el monitoreo de estructuras en sistemas de pórticos*, s.l.: s.n.

Hoult, N., Fidler, P., Hill, P. & Middleton, C., 2010. *Long-Term Wireless Structural Health Monitoring of the Ferriby Road Bridge*, s.l.: s.n.

Humair, S., Zaid , M., Abdullah, M. & Mairaj, T., 2018. *SHM of Concrete Bridge Structures using Wireless Sensor Networks*, s.l.: s.n.

Hu, X., Wang, B. & Ji, H., 2013. *A wireless sensor network based structural health monitoring system for highway bridges*, s.l.: s.n.

IEEE , 2009. *Familia IEEE 802.11*, s.l.: s.n.

ISO, 2019. *ISO 16838: Non-destructive testing- Acoustic emission testing- Test method for classification of active cracks in concrete structures*, s.l.: s.n.

Kammer, D., 1992. *Effects of model error on sensor placement for on-orbit modal identification of large space structures*, s.l.: s.n.

Lazcano, A., Salgado, A. R., Zamora, R. & Martínez, M., 2011. *Evaluación de Métodos de daño en estructuras mediante el uso de vibraciones*, s.l.: s.n.

Lee, K., 2007. *Structural damage detection in the frequency domain using neural networks*, s.l.: s.n.

Linderman, L., Mechitov, K. & Spencer, B., 2013. *TinyOS-based real-time wireless data acquisition framework for structural health monitoring and control*, s.l.: s.n.

Lych, J. & Loh, K., 2006. *A Summary Review of Wireless Sensors and Sensor Networks for Structural Health Monitoring*, s.l.: s.n.

Lydon, M. y otros, 2016. *Recent developments in bridge weight in motion (B-WIM)*, s.l.: s.n.

Magalhaes, F., 2010. *Operational Modal Analysis for Testing and Monitoring of Bridge and Special Structures, PhD Thesis*, s.l.: s.n.

Magalhaes, F., Cunha, A. & Caetano, E., 2012. *Vibration based structural health monitoring of an arch bridge: From automated OMA to damage detection*, s.l.: s.n.

Martinez, L. y otros, 2016. *Sistema Inteligente y protocolos de actuación para monitoreo remoto de puentes*, s.l.: s.n.

Mayorga, J., 2016. *Metodología para el diseño preliminar de sistemas de diagnóstico estructural: conceptos, recomendaciones y aplicaciones para puentes*, Concepción, Chile: s.n.

Mayorga, J., 2016. *Metodología para el diseño preliminar de sistemas de diagnóstico estructural: conceptos, recomendaciones y aplicaciones para puentes*, s.l.: s.n.

Meng, D. & Ansari, F., 2013. *Damped fiber optic low-frequency tiltmeter for real-time monitoring of structural displacements*, s.l.: s.n.

Meng, X., 2002. *Real-time deformation monitoring of bridges using GPS/Accelerometers*, s.l.: s.n.

Meng, X., Dodson, A. & Wyn Roberts, G., 2007. *Detecting bridge dynamics with GPS and triaxial accelerometers*, s.l.: s.n.

Meyer, J. & Motavall, M., 2010. *Wireless sensor networks for long-term structural health monitoring*, s.l.: s.n.

Micron Optics, Inc, 2012. *Optical fiber sensor guide: fundamental and applications*, s.l.: s.n.

Miller, R. & Hill, E., 2005. *Nondestructive Testing Handbook, Third Edition: Volume 6, Acoustic Emission*, s.l.: s.n.

MOP, 2012. *Manual de Carreteras; Volumen 3 Instrucciones y criterios de diseño*, s.l.: s.n.

MOP, 2019. *Terminos de Referencia Convocatoria: Modelo de Monitoreo de Infraestructura, Prototipo de soluciones en puentes Seminario y Toltén*, s.l.: s.n.

Myra, L., 2016. *Recent Developments in Bridge Weight in Motion (B-WIM)*, s.l.: s.n.

Nair, K. & Kiremidjian, A., 2006. *Time series-based damage detection and localization algorithm with application to the ASCE benchmark structure*, s.l.: s.n.

National Instruments, 2010. *Fundamentos de la detección óptica*, s.l.: s.n.

Navarro, F., 2014. *Sensores de fibra óptica FBG para el monitoreo de la salud estructural de los puentes*, s.l.: s.n.

Niu, J. y otros, 2009. *A structural health monitoring system using wireless sensor network*, s.l.: s.n.

Noel, A., Abdaoui, A., Tarek, E. & Hossam, M., 2017. *Structural Health Monitoring using Wireless Sensor Networks: A comprehensive Survey*, s.l.: s.n.

Noorsuhada, M., 2016. *An overview of fatigue damage assessment of reinforced concrete structures with the aid of acoustic emission technique*, s.l.: s.n.

Ono, K., 2007. *Structural Integrity Evaluation using Acoustic Emission*, s.l.: s.n.

Paredes, J., 2013. *Modelización numérica del comportamiento constitutivo del daño local y global y su correlación con la evolución de las frecuencias naturales en estructuras de hormigón reforzado*, s.l.: s.n.

Pérez, D., 2014. *Técnicas de monitorización del patrimonio construido: Desarrollo y Aplicación*, s.l.: s.n.

Pérez, M., Quintana, J., Francisco, C. & Hernández, A., 2012. *Análisis de sensibilidad para la ubicación de sensores en estructuras*, s.l.: s.n.

PITRA, 2013. *Monitoreo y Evaluación Estructural de Puentes utilizando un Sistema de Instrumentación Inalámbrico*, s.l.: s.n.

Puentes, U. d., 2013. *Monitoreo y Evaluación Estructural de Puentes utilizando un Sistema de Instrumentación Inalámbrico*, s.l.: Programa de Infraestructura del Transporte, Costa Rica.

Reda Taha, M. M., Noureldin, A., Lucero, J. L. & Baca, T. J., 2006. *Wavelet Transform for Structural Health Monitoring: A compendium of Uses and Features*, s.l.: s.n.

Reda Taha, M., Noureldin, A. & Lucero, J., 2014. *Wavelet Transform for Structural Health Monitoring: A Compendium of Uses and Features.*, s.l.: s.n.

Roberts, G., Meng, X. & Dodson, A., 2001. *The Use of Kinematic GPS and Triaxial Accelerometers to Monitor the Deflections of Large Bridges*, s.l.: s.n.

Rodriguez, D., Vera-Lopez, E. & Muñoz, H., 2016. *Diseño e implementación de un Sistema de adquisición y monitoreo de datos (SHM) para un rectificador de protección catódica usado en ductos*, s.l.: s.n.

Romero, R., Moraila, C. & Ortíz, P., 2012. *Medición de la Vibración en Esstructuras de Puentes Empleando GPS*, s.l.: s.n.

Romero, R., Moraila, C. & Pedro, O., 2012. *Medición de la Vibración en Estructuras de Puentes empleando GPS*, s.l.: s.n.

Ruiz, A. & Garita, C., 2019. *Diseño de redes de sensores colaborativas para monitorización de salud estructural de puentes*, s.l.: s.n.

Saboonchi, H., Ozevin, D. & Kabir, M., 2016. *MEMS sensor fusion: Acoustic emission and strain*, s.l.: s.n.

Salawu, O., 1997. *Detection of structural damage through changes in frequency: a review*, s.l.: s.n.

SAMCO, 2006. *F08bnGuideline for Structural Health Monitoring*, s.l.: s.n.

Serna, F., 2011. *Diseño de la Instrumentación electrónica que permita el Seguimiento Estructural de un Puente en Gauda*, s.l.: s.n.

Tensi, H., 2007. *The Kaiser-effect and its scientific background*, s.l.: s.n.

Tischer, H., Thomson, P. & Marulanda, J., 2007. *Comparación de tres transformadas para distribuciones tiempo-frecuencia por medio de su aplicación a registros de vibraciones ambientales*, s.l.: s.n.

Ti, T.-H. & Li, H.-N., 2012. *Methodology Developments in Sensor Placement for Health Monitoring of Civil Infrastructures*, s.l.: s.n.

Viviescas, J., Herrera, L. & Arenas, J., 2017. *Determinación de la Capacidad Resistente de Puentes Viga-Losa en Concreto Postensado mediante Pruebas de Vibración Ambiental: Caso de Estudio Puente El Ramo*, s.l.: s.n.

Wei, F. & Pizhohg, Q., 2013. *Vibration-based Damage Identification Methods: A Review and Comparative Study*, s.l.: Department of Civil and Environmental Engineering and Composite Materials and Engineering Center, Washington State University.

Wenzer, H., 2013. *Health Monitoring of Bridges*. s.l.:WILEY.

Whelan, M., Gangone, M. & Janoyan, K., 2009. *Highway Bridge Assessment Using an Adaptive Real-Time Wireless Sensor Network*, s.l.: s.n.

Whelan, M., Gangone, M., Janoyan, K. & Cross, K., 2007. *Reliable High-Rate Bridge Monitoring using Dense Wireless Sensor Arrays*, s.l.: s.n.

Whelan, M. & Janoyan, K., 2009. *Design of a robust, high-rate wireless sensor network for static and dynamac structural monitoring*, s.l.: s.n.

Wilches, J., Santa María, H., Riddell, R. & Arrate, C., 2019. *Evaluación de las disposiciones de diseño de puentes chilenos mediante curvas de fragilidad*, s.l.: s.n.

Woong, D., Park, H., Choi, S. W. & Kim, Y., 2013. *A Wireless MEMS-Based Inclinometer Sensor Node for Structural Health Monitoring*, s.l.: s.n.

Worley, R. y otros, 2019. *Acoustic Emission Sensing for Crack Monitoring in Prefabricated and Prestressed Reinforced Concrete Bridge Girders*, s.l.: s.n.

Xiao, F., Chen, G. & Hulse, L., 2017. *Monitoring Bridge Dynamic Responses Using Fiber Bragg Grating Tiltmeters*, s.l.: s.n.

Xu, Y. y otros, 2011. *Damage Detection and Reliability Assessment of Building Structures Using Stochastic Approaches*, s.l.: s.n.

Yangtao, D., 2010. *Bridges Structural Health Monitoring and Deterioration Detection Synthesis of Knowledge and Technology*, s.l.: University of Alaska Fairbanks.

Yapar, O., Basu, P., Volgyesi, P. & Ledecz, A., 2015. *Structural health monitoring of bridges with piezoelectric AE sensors*, s.l.: s.n.

Yi Cheng, L. K., 2017. *Introducción al Monitoreo de la Condición Estructural de Puentes*, s.l.: Universidad de Costa Rica.

Yi Cheng, L. K., 2017. *Introducción al Monitoreo de la Condición Estructural de Puentes*, s.l.: Programa de Ingeniería Estructural, Costa Rica.

Yi, T., Li, H. & Gu, M., 2010. *Recent Research and Applications of GPS based technology for Bridge Health Monitoring*, s.l.: s.n.

Yuyama, S., Yokoyama, K., Niitani, K. & Ohtsu, M., 2006. *Detection and evaluation of failures in high-strength tendon of prestressed concrete bridge by acoustic emission*, s.l.: s.n.

Zhang, W., Sun, L. M. & Sun, S. W., 2017. *Bridge-Deflection Estimation through Inclinometer Data Considering Structural Damage*, s.l.: s.n.

Anexos

Anexo A

A continuación, se detallan dos métodos dinámicos para la detección y localización de daño en una estructura.

A.1 Análisis Modal

Metodología para la examinación del comportamiento dinámico de estructuras, donde se describen las características mecánicas por parámetros de frecuencia, modos de vibrar y valores de tasa de amortiguamiento. Esta información permite:

- Verificar, modificar y optimizar el diseño.
- Mejorar los modelos dinámicos.
- Efectuar monitoreo global e identificar daños.

Excitación de estructuras y sistemas para análisis modal.

El primer paso para diseñar el sistema de análisis modal es definir la frecuencia y el rango de interés de la forma modal, lo cual se puede lograr con modelos analíticos simples o medidas previas a la instalación del sistema. También se deben considerar los grados de libertad de interés. Para el análisis dinámico, se puede utilizar excitaciones ambientales, de impacto o forzadas, en general, se suele utilizar fuentes de excitación ambiental, ya que presentan menores costos al no requerir un sistema de excitación externa. No obstante, las frecuencias de excitación naturales pueden no estar distribuidas uniformemente en el rango de frecuencia de interés. Junto con esto, las frecuencias de excitación natural pueden estar acompañadas de señales ambientales u otros parámetros no deseables. Como se muestra en la imagen 2-6, la señal de excitaciones ambientales presenta una distribución no uniforme del rango de frecuencia, lo cual se puede considerar como una desventaja en el análisis de datos (Czichos, 2013).

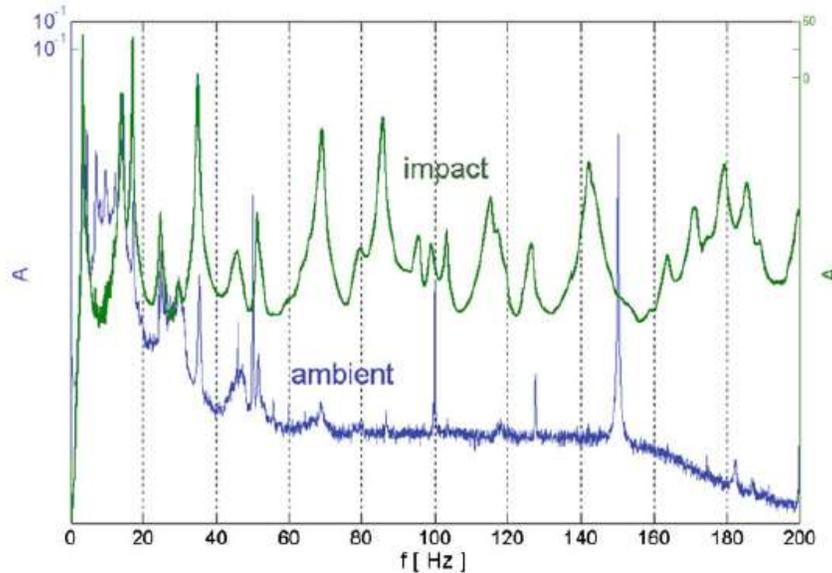


Ilustración A.1 Comparación de resultado de análisis dinámico de una pasarela peatonal de acero con excitación ambiental y excitación por impacto

Para la aplicación de sistemas de excitación forzada, es necesario conocer el posible rango de frecuencia de la estructura. Estos sistemas se pueden realizar con excitaciones mediante cargas aplicadas, constantes o puntuales, vibraciones forzadas y otros. Es necesario considerar que la masa aplicada o interconectada a la estructura, no debe afectar sus propiedades dinámicas.

A.1.2 Aplicaciones

Análisis modal en puentes

En un puente de concreto en Berlín (Czichos, 2013), se implementaron procedimientos específicos de monitoreo automatizado y detección de daños. Como primera instancia, se desarrolló un análisis modal extensivo, para validar y corregir el modelo numérico de elementos finitos, para que el comportamiento del modelo estructural fuera idéntico al del puente. Producto de estos modelos perfeccionados, se puede estudiar la información medida de la estructura para determinar la posible detección de daños, junto con su ubicación, tipo y cantidad.

Para el análisis modal se utilizó una red de medición con más de 245 puntos en el tablero del puente. Otros 32 puntos se instalaron en las columnas del mismo. Los sensores utilizados fueron transductores de velocidad y acelerómetros del tipo Bruel y Kjaer. Junto con esto se realizó un ensayo de excitación con un vibrador dinámico de EMPA, y su ubicación correspondió al punto que permitiera excitar la mayor cantidad de modos de vibrar dentro del rango de frecuencia de hasta 20 Hz.

Para la determinación de las frecuencias de la estructura y sus correspondientes formas modales, se consideraron mediciones de excitación y las respuestas de vibración del puente para identificar

las funciones de transferencia. De esta manera se derivaron las frecuencias y formas modales, utilizando el procedimiento de separación de fase (Czichos, 2013).

Para la determinación del comportamiento de vibración del puente, se utilizaron transductores de velocidad del tipo HS1. La finalidad de esta investigación era utilizar la mayor cantidad de información modal sobre la estructura, para validar el modelo numérico.

En la Ilustración A-2 se muestran dos formas modales con frecuencias 8.42 y 10.31 Hz. El modelo superior es una superposición de torsión y flexión, donde los apoyos también se ven afectados, mientras que la inferior corresponde a una superposición de modos longitudinales y transversales de flexión, que inducen vibraciones de la losa del puente.

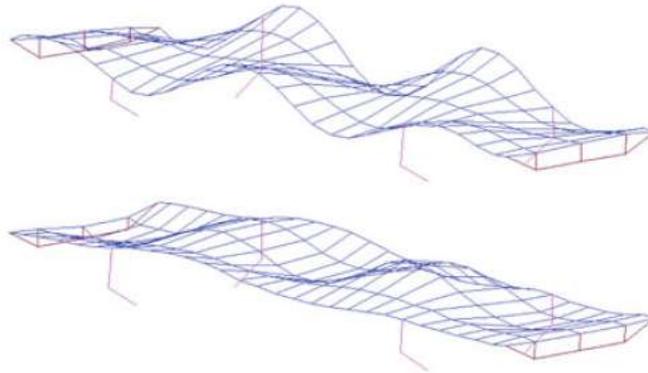


Ilustración A-2: Formas modales experimentales con frecuencias naturales 10.31 y 8.42 Hz

A.2 Emisiones Acústicas

El análisis de emisiones acústicas (AE) está basado en la detección de movimiento dinámico en la superficie, provocado por ondas elásticas de tensiones, las cuales son generadas por la liberación espontánea de energía elástica acumulada de micro o macro fallas durante la aplicación de esfuerzos estáticos o dinámicos.

Al contrario de las vibraciones, que son oscilaciones mecánicas mediante un punto de equilibrio, AE son ondas elásticas transitorias o continuas excitadas por micro eventos dentro de un material en diferentes estados (como fatiga o agrietamiento), por la interacción sólido-sólido (impacto o fricción) o sólido-fluido (filtración). El rango de frecuencia típica para la detección de grietas es de 100 Hz.

Sus características principales son:

- Método pasivo que monitorea la respuesta dinámica del material frente a cargas aplicadas o ambientales.
- Permite la detección de fuentes activas y procesos de degradación que evolucionan con el tiempo, dependiendo de las propiedades y geometría del material.

- Permite un monitoreo global de toda la estructura, siendo capaz de detectar defectos crecientes en la estructura medida. Ofrece un monitoreo dinámico en tiempo real de cualquier discontinuidad.

Medición de emisiones acústicas

Las emisiones acústicas (AE) son generadas por procesos como deformación plástica, fricción y filtración (líquidos). El mecanismo de origen de emisiones acústicas microscópicas puede generar AE con un amplio rango de frecuencias cercano a la ubicación de origen, luego las ondas se propagan a lo largo del material, las cuales golpean al sensor, y este obtiene información sobre el comportamiento interno y efectos geométricos.

Las emisiones se ven afectadas por la atenuación de las ondas provocada por la geometría y por la absorción de energía del material, o por reflexión en límites geométricos. Cuando una onda acústica choca con un sensor piezométrico AE, éste transforma la señal en una señal eléctrica, las cuales son procesadas para detectar, caracterizar y localizar la fuente de origen. La sensibilidad del sensor AE, que depende del modo y frecuencia de la onda analizada, es clave para la detección de señales AE y localización del origen de esta.

El procesamiento y acondicionamiento de las señales medidas incluye amplificación, filtración y extracción de las propiedades de la señal. El procesamiento de señal aplica un filtro de banda para eliminar el ruido, realiza la conversión análogo-digital de la señal y una extracción de características límites con sus mediciones en tiempo real.

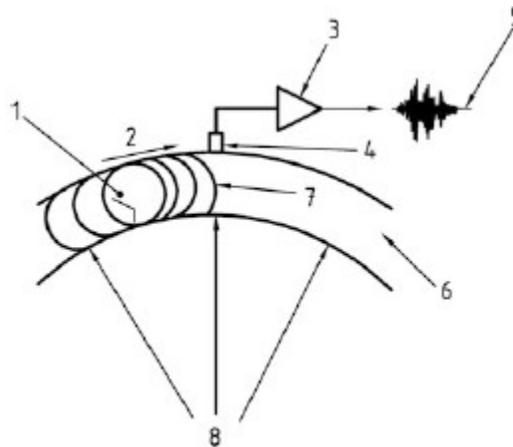


Ilustración A-2: Principio de medición de AE: 1. Falla en crecimiento, 2 ondas superficiales, 3 preamplificación, 4 sensor AE, 5 señal de salida, 6 sección del componente, 7 ondas, 8 carga aplicada

La señal AE es analizada y reducida a características de la señal como tiempo de llegada, valor máximo, duración de señal y energía.

La localización de fuentes de AE esporádicos, se puede realizar con un sensor, entregando una zona de ubicación; dos sensores, entregando una ubicación lineal; o con 3 o más sensores

distribuidos en un plano. La precisión de la ubicación se ve afectada por el modo de onda, el comportamiento del material y por la posibilidad que la onda se propague por diferentes materiales.

Estrategias para un monitoreo de salud estructural

El monitoreo mediante emisiones acústicas se puede realizar temporal o permanentemente, por lo cual se define una estrategia para cada caso.

1. Detección de ondas transitorias elásticas AE, que comienzan el monitoreo cuando las señales sobrepasan un límite definido sobre el máximo del ruido ambiental.
 - a. Señal transitoria.
 - b. Determinación de ubicación por tiempo de llegada de la señal.
 - c. Determinación de características de fuente de AE.
2. Grabación de la onda AE completa, independiente de los límites.
 - a. Señal continua.
 - b. Aplicación de filtros para separar ruido de mecanismos de degradación.
 - c. Localización de fuentes de AE basado en discriminación del modo de onda, atenuación y técnicas de correlación.
 - d. Determinación de características de la fuente de AE.

Evaluación y Grados de severidad de fuentes de AE.

La metodología aplicada al monitoreo integral estructural considera los siguientes pasos:

1. Comprender la naturaleza de las fuentes de AE para distinguir entre fuentes primarias de fractura, micro o macro agrietamiento, en contraste con fuentes secundarias de fricción o corrosión (Czichos, 2013).
2. Herramientas de evaluación como el efecto Felicity o efecto Kaiser (Tensi, 2007).
3. Localización y agrupación de fuentes para determinar potenciales áreas de pérdida de integridad.
4. Caracterización de la fuente mediante peak de amplitud, duración, crecimiento y otros parámetros, que incluyen diferentes tipos de fallas.

Sin embargo, para evaluar la integridad estructural, se necesitan otros métodos no destructivos (NDT). Períodos de espera durante la carga de las estructuras son un aspecto clave para la evaluación de AE, por ejemplo, una actividad no decreciente de AE, o una señal AR de grandes amplitudes durante períodos de espera infieren situaciones de daños inestables, como agrietamiento. Una concentración de fuentes AE dentro de una ubicación, entrega información para la evaluación de daños, pero se requieren procedimientos para la corrección de la amplitud de la señal AE.

Análisis de las características y mecanismos de emisiones acústicas

- Medición de eventos, medición periódica de valores máximos (número de defectos).
- Análisis espectral (FFT (Fast Fourier Transform), WT (Wavelet T)).
- Amplitud de la señal mayor a RMS (Raíz de la media cuadrática) (Crecimiento de grietas).

- Valores de RMS (severidad de defectos).
- Espectro de señal: AE de alta frecuencia (formación de grietas) o AE de Baja frecuencia (pulso de impacto).

Para la detección de mecanismos que generan ondas acústicas, existen:

1. Métodos de clasificación e identificación de Fuentes de AE:
 - a. Amplitud de peak
 - b. Energía
 - c. Tiempo de aumento
 - d. Duración
2. Métodos avanzados de clasificación e identificación
 - a. Análisis de señales de espectro de frecuencia (FFT): por promedio de la frecuencia, centroide de la frecuencia, peak de amplitud
 - b. Correlación de la energía de señal vs la frecuencia característica
 - c. Análisis de onda modal (Ono, 2007)
 - d. Reconocimiento estadístico de patrones (Miller & Hill, 2005)

Diagnóstico técnico usando métodos AE: Ejemplos

El principal inconveniente de la aplicación de técnicas AE en construcciones complejas y de gran magnitud, es la atenuación de la onda y la reflexión de esta antes de llegar al sensor, haciendo la detección y localización de daños compleja. Es por esto que los sistemas de monitoreo deben estar lo más cerca posible de áreas críticas con un alto riesgo de falla por propagación de grietas.

Estructuras de Concreto: Generalmente se utilizan dos índices para calificar daños en estructuras de concreto, según la práctica recomendada (ISO, 2019)

Razón de carga: carga al comienzo de la actividad AE, por la carga previa.

1. Razón de quietud: Número de actividad de AE acumulada durante la descarga, por actividad total de AE.
2. Razón de carga: Razón entre la carga al comienzo de la actividad AE, por la carga previa.

La razón de carga puede ser mayor a 1 en una estructura saludable, debido a la acumulación de daño, la razón baja de 1.0, generando AE a menor nivel que antes. Para estructuras severamente dañadas, la razón de carga es menor a 1.0 y la razón de quietud es mayor a 1. Los Índices de AE no pueden ser relacionados cuantitativamente con el grado de daño, pero sí pueden indicar partes de la estructura que necesitan una investigación más profunda.

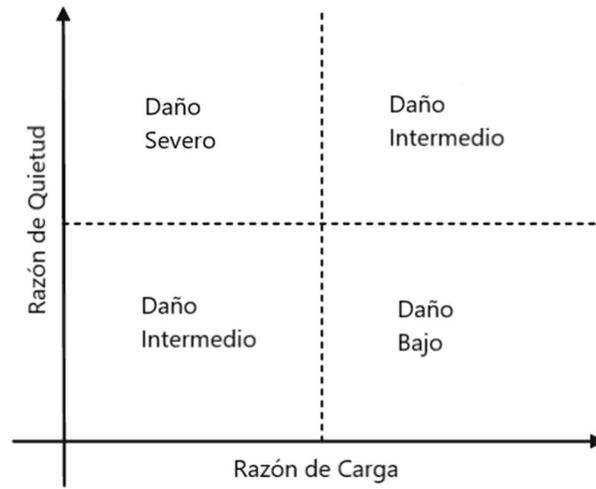


Ilustración A.0-1: Calificación de daño en concreto en función de la razón de carga y la razón de quietud.

Anexo B

B.1 Bridge Weight in Motion

El sistema B-WIM (por sus siglas en inglés, Bridge Weight in Motion) se basa en un sistema de sensores que permiten utilizar un puente como un mecanismo de peso para determinar la carga actual de tráfico sobre este. Esto se realiza monitoreando los esfuerzos inducidos por los vehículos en el tablero de la estructura. Los instrumentos más utilizados corresponden a las galgas extensiométricas, y este método corresponde a un método simple y menos intrusivo a la estructura.

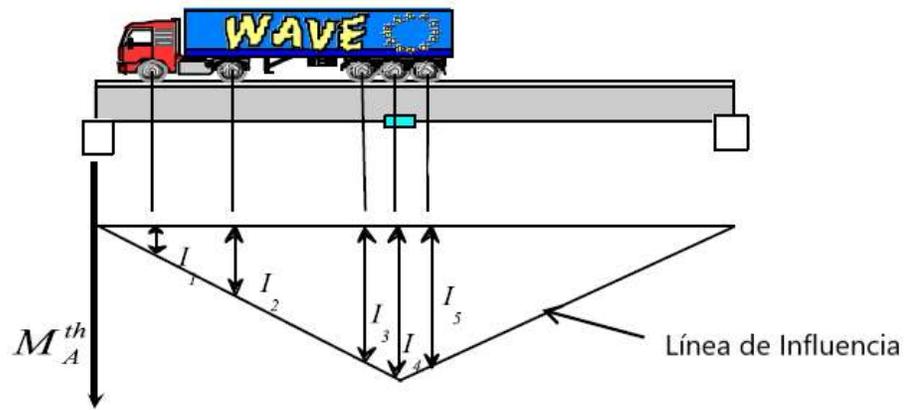
Esta información puede utilizarse para un manejo económico de las redes de transporte y se presenta como una herramienta para la evaluación de la seguridad del puente. Una evaluación que considera las cargas aplicadas a cada punto de la estructura basado en el tráfico actual sobre esta.

El sistema de B-WIM utiliza la medida de deformación de un puente, bajo la carga viva del tráfico, para estimar las características de los vehículos que transitan sobre él, entregando información imparcial del tráfico. Se ha demostrado que estos sistemas pueden entregar resultados con una precisión de $\pm 5\%$ en el 95% de los resultados, lo cual resulta suficiente para medir el peso de los vehículos (Lydon, et al., 2016).

Como ventajas del sistema se puede mencionar que solo se requiere de un par de semanas para obtener información viable de cada lugar a monitorear y que el sistema es capaz de entregar información realística sobre las cargas de tránsito y el comportamiento actual de la estructura bajo esta influencia.

Existen diferentes tipos de B-WIM dependiendo de la localización y velocidad como por ejemplo el sistema “WIM de baja velocidad” que realiza las mediciones en un área dedicada fuera de las líneas de tráfico, donde los vehículos deben andar a una velocidad entre 5 a 10 km/h para poder eliminar los efectos dinámicos. Este tipo de WIM se puede observar en diferentes puntos a lo largo de la carretera 5 del país. Otro método corresponde al “WIM de alta velocidad” donde las mediciones se realizan en las pistas de tránsito sin desacelerar o parar a los vehículos. Las medidas son afectadas por la dinámica de los vehículos por lo cual se presentan mediciones con menor precisión.

Concepto
B-WIM



$$M_A^{th} = W_1 \times I_1 + W_2 \times I_2 + \dots$$

Sensores de
esfuerzo bajo la
estructura

Respuesta
estructural
tras carga de
tránsito



Puente utilizado
como mecanismo
de medición

Sistema de
adquisición de
datos

Ilustración B-1: Concepto de B-WIM.