GUIA PARA LA INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO DE PUENTES

Octubre de 2022

EN PROCESO DE ADOPCION

NOTA

La presente GUIA DE INSTRUMENTACION Y MONITOREO se obtiene como resultado de la adaptación por parte de la Subdirección de planificación de infraestructura del volumen denominado MANUAL METODOLÓGICO PARA INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO DE PUENTES desarrollado para el SISTEMA INTELIGENTE DE GESTION DE PUENTES-SIGP y mediante la cual se pretende establecer lineamientos para estas actividades de instrumentación y monitoreo.

No obstante, es importante precisar que siendo un documento técnico en versión preliminar se resalta que los procesos y métodos descritos en el documento hacen parte del desarrollo de los trabajos implementados en desarrollo del SIGP, por lo cual se encuentran establecidos un mínimo de equipos y/o software que pueden encontrarse en el mercado; de igual forma la instrumentación y monitoreo dependerá de la necesidad de cada estructura.

Finalmente es necesario mantener su actualización teniendo en cuenta los continuos avances tecnológicos tanto en instrumentos como en software

EN PROCESO DE ADOPCION

RESUMEN

La presente guía busca ser un instructivo básico que ofrezca al INVIAS un procedimiento claro para la ejecución de las actividades de monitoreo e instrumentación electrónica de puentes como una herramienta práctica para la evaluación de condición y desempeño.

El objetivo principal de este documento es definir una metodología desagregada por fases para la implementación de sistemas de monitoreo de puentes, determinando claramente las actividades, insumos y productos de cada una de ellas. Las fases definidas por este protocolo son:

- Fase 1: Definición del plan de monitoreo.
- Fase 2: Diseño del sistema de instrumentación.
- Fase 3: Montaje e implementación.
- Fase 4: Operación bajo protocolos establecidos.
- Fase 5: Procesamiento de la información, reportes sobre la infraestructura y acciones a tomar.

EN PROCESO DE ADOPCION

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 9

2. MONITOREO DE PUENTES 10

2.1 Alcance 10

2.2 Objetivos 10

2.3 Terminología y definiciones 11

2.4 Normas técnicas y referencias de monitoreo e instrumentación 12

3. SISTEMAS DE MONITOREO 15

3.1 Sensores 16

3.1.1 Medición de desplazamiento 21

3.1.2 Vibraciones en estructuras 29

3.1.3 Inclinación 32

3.1.4 Temperatura 33

3.1.5 Cargas estáticas y dinámicas 35

3.2 Sistemas de adquisición de datos 38

3.2.1 Componentes básicos de un sistema de digitalización 41

3.3 Pruebas sin contacto 44

3.3.1 Medición de distancia por tiempo de vuelo. (ToF, time of flight) 44

3.3.2 LIDAR (Light Detection and Ranging) 44

3.3.3 SONAR (Sound Navigation and Ranging) 45

3.3.4 RADAR (Radio Detection and Ranging) 45

3.3.5 Correlación Digital de Imágenes 46

3.4 Sistemas de comunicación 48

3.4.1 Modelo OSI 48

3.4.2 Protocolo TCP/IP 50

3.4.3 Comunicaciones locales 50

3.4.4 Comunicaciones de Campo 52

3.4.5 Comunicaciones de largo alcance 55

3.4.6 Comunicaciones con la Nube 58

4 PROTOCOLO DE INSTRUMENTACIÓN 59

4.1 Fase 1: Definición del plan de monitoreo 60

4.1.1 Ejemplo Fase:1 Definición del plan de monitoreo 62

4.2 Fase 2: Diseño del sistema de instrumentación 64

EN PROCESO DE ADOPCION

4.2.1 Ejemplo Fase 2: Esquema general de medición y planos de conexión a puntos de medición 65
4.3 Fase 3: Montaje e implementación 66
4.3.1 Consideraciones sobre el de sitio de instalación. 67
4.3.2 Software de adquisición y despliegue 67
4.3.3 Puesta a punto. Pruebas de validación. 68
4.4 Fase 4: Operación bajo protocolos establecidos 70
4.4.1 Ejemplo Fase 4: Operación bajo protocolos establecidos 71
4.5 Fase 5: Procesamiento de información, reportes sobre la infraestructura y acciones a tomar 72
5 REFERENCIAS 74

EN PROCESO DE ADOPCION

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Referencias nacionales 12
Tabla 2-2. Referencias internacionales 14
Tabla 3-1. Sensores típicos para utilizar 16
Tabla 3-3. Criterios de selección de sensores. Fuente: (Aktan et al., 2002) 17
Tabla 3-4. Criterios de selección de sensores (Parte 1). Fuente: (Aktan et al., 2002) 19
Tabla 3-5. Criterios de selección de sensores (Parte 2). Fuente: (Aktan et al., 2002) 20
Tabla 3-6. Principales tipos de acelerómetros y sus especificaciones. 31
Tabla 3-7. Ventajas y limitaciones de celdas de carga. Fuente: Adaptada de (Arcas, 2008) 36
Tabla 4-1. Características de las variables a medir. 63

EN PROCESO DE ADOPCION

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3-1. Componentes generales de un sistema de monitoreo. Fuentes: Adaptada de (Campbell R. Middleton, Paul R. A. Fidler, 2016) 15

Figura 3-2. Medidores de desplazamiento resistivo. 21

Figura 3-3. Imagen medidora de desplazamiento resistivo lineal típico, tomado de (BDI, 2020c). 22

Figura 3-4. Potenciómetro rotacional para medir distancia, tomado de (BDI, 2020a). 22

Figura 3-5. Potenciómetro para medir distancias pequeñas, tomado de (BDI, 2020b). 22

Figura 3-6. Sensor de reluctancia variable. 22

Figura 3-7. LVIT. 23

Figura 3-8. LVDT. 23

Figura 3-9. Algunas presentaciones de LVIT y LVDTs, Tomado de (Hbm.com, 2020) 24

Figura 3-10. Uso de un LVDT para medir las deformaciones unitarias del cordón superior de un puente peatonal durante una prueba de carga 24

Figura 3-11. Uso de un LVDT de hilo para medir deformaciones verticales de un puente férreo. 24

Figura 3-12. Medidor de desplazamiento por corrientes de Eddy, tomado de (Micro-epsilon, 2020b) 25

Figura 3-13. Medidores de desplazamiento por principio capacitivo, fuente (Micro-epsilon, 2020a) 25

Figura 3-14. Principio de medición por FBG, adaptado de (Hitech, n.d.) 26

Figura 3-15. Equipos para medición con FBG, tomado de (HBM, 2020b) 27

Figura 3-16. Acelerómetros de fibra Óptica para el puente Pumarejo. Fuente:(Rehabtec, 2020) 27

Figura 3-17. Esquema funcionamiento galga piezo-resistiva 28

Figura 3-18. Ejemplos de galgas extensiométricas, tomado de (HBM, 2020a) 28

Figura 3-19. Medidor de desplazamiento basado en galgas extensiométricas, tomado de (HBM, 2020c). 29

Figura 3-20. Ejemplo de instrumentación para evaluación de dinámica del puente Dos Quebrada. Fuente: (INVIAS/PUJ, 2008) 30

Figura 3-21. Algunos tipos de inclinómetros de dos ejes. 32

Figura 3-22. Inclinómetro instalado en baranda de puente para medir pendiente curvatura en una prueba de carga 33

Figura 3-23. Variedad de empaque de sensores de temperatura que se adaptan a diferentes condiciones de medición. 34

Figura 3-24. Instrumentación proyectada para el puente Únete. Utilización de sensores de temperatura. . 35

Figura 3-25 Celda de carga de tirante 37

Figura 3-26 . Anclaje destapado para la medición de la tensión de tirante. Fuente: (INVIAS/PUJ, 2008) 37

Figura 3-27 . Gato Monotorón VSL para realizar la prueba de tensión. Fuente: (INVIAS/PUJ, 2008) 37

Figura 3-28. Figura descriptiva de Repetitividad, Reproducibilidad y Precisión (a) Medida más repetible. (b)Medida más precisa 39

EN PROCESO DE ADOPCION

Figura 3-29 Algunos sistemas de adquisición (diferentes marcas) de datos empleados para la instrumentación de puentes en Colombia 41
Figura 3-30. Elementos claves de un sistema de datos muestreados 42
Figura 3-31. Esquema funcionamiento Lidar (Light Detection and Ranging) 44
Figura 3-32. Medición de nivel del río. 45
Figura 3-33. Sistema de RADAR para monitoreo de ladera, tomado de (Groundprobe, n.d.) 46
Figura 3-34. Esquema montaje para mediciones con cámaras. 46
Figura 3-35. Niveles del Modelo OSI 49
Figura 4-1 Flujograma del proceso de monitoreo. 61
Figura 4-2 (a) Ubicación geográfica puente a monitorear (b) Puente a monitorear 62
Figura 4-3 Ubicación de sensores en el puente (a) Sensores arco aguas arriba (b) Sensores arco aguas abajo 63
Figura 4-4 Esquema general de medición de socavación para pila del puente Tocaría. 66
Figura 4-5 Plano de conexión a punto de medición para pila del puente Tocaría. 66
Figura 4-6 Uso de medios auxiliares para la instalación de sensores. 67
Figura 4-7 Señales tomadas para verificar consistencia de los datos. 69
Figura 4-8 Señales tomadas de un elemento para verificar la consistencia de los datos. 70
Figura 4-9. Hipótesis de carga para verificar deformaciones unitarias en el pendolón 3. 70
Figura 4-10. Interface gráfica de monitoreo 73

EN PROCESO DE ADOPCION

CAPÍTULO

1

1. INTRODUCCIÓN

La incorporación de sensores para determinar estados y comportamientos en procesos y componentes estructurales, a través de medición de variables físicas, es una estrategia común en el sector de la industria y en las ingenierías mecánica y aeroespacial particularmente. Algunas de estas estrategias se han venido incorporando a la ingeniería civil, especialmente en las últimas dos décadas, dado el nivel extraordinario de desarrollo de sensores y a la reducción de los costos en sus tecnologías. Esto unido a los aumentos en las velocidades de procesamiento de servidores y computadores, así como a las posibilidades de almacenamiento en la nube más el mejoramiento de las comunicaciones hace de esta nueva disciplina una vertiente promisoria en temas de investigación y desarrollo en la ingeniería de estructuras. Por esto se espera en los próximos años la incorporación de nuevas tecnologías de detección y seguimiento mediante sensores como una práctica común en la ingeniería civil y su utilización común en la administración y gestión de activos de infraestructura, como complemento a las inspecciones visuales y a las evaluaciones de diagnóstico mediante ensayos no destructivos.

El monitoreo de salud estructural (SHM por sus siglas en inglés), es un proceso que permite realizar el seguimiento y registro continuo y permanente de variables representativas del comportamiento de una estructura, como lo pueden ser sus deflexiones y las elongaciones o contracciones en las fibras inferiores o superiores de vigas y losas (correlacionales a esfuerzos). Esta información permite formar un concepto técnicamente fundamentado y mucho más objetivo sobre la condición del puente determinando también la gravedad y evolución futura de los deterioros. En términos de la operación de los puentes poder observar de forma remota comportamientos anómalos o fuera de rango, podría alertar sobre la existencia de daños o sobrecargas lo que puede posibilitar generar acciones de control, como pueden ser inspecciones no programas y/o aviso a las autoridades para la reducción o suspensión del paso vehicular por el puente. De esta misma manera se pueden hacer validaciones permanentes sobre el resultado de los trabajos de mantenimiento o de rehabilitación, ayudando así en la definición e implementación de políticas más acertadas a este respecto.

En este documento se presenta el diseño conceptual de un sistema de monitoreo, con una terminología básica que se utiliza en esta disciplina, combina diferentes áreas del conocimiento científico aplicado. Seguidamente, se exponen los componentes generales de un sistema de monitoreo, dando un vistazo muy general a los sensores que se utilizan típicamente en instrumentación de puentes. Finalmente, se establece como debe ser el flujo de información que arroje el sistema implementado. A lo largo del protocolo de implementación se sugieren algunos intercambios de información entre los responsables de esta para tener la trazabilidad del diseño y los procedimientos claros a lo largo de todo el proceso.

EN PROCESO DE ADOPCIÓN

CAPÍTULO
2

2. MONITOREO DE PUENTES

2.1 Alcance

El alcance de esta guía es apoyar con buenas prácticas a los ejecutores de trabajo de monitoreo y a los demás interesados (interventores, constructores, supervisores, diseñadores, etc.), para la evaluación de la condición de un puente a lo largo de su construcción y/o vida útil. Esta guía no constituye unas prescripciones únicas del diseño en detalle de la instrumentación y el monitoreo de un puente.

El monitoreo se debe entender como un medio-herramienta y no un fin en sí mismo. El propósito dentro del Sistema Inteligente de Gestión de Puentes (SIGP), es solamente realizar la identificación directa de daños y servir como insumo en el módulo de evaluación de riesgos operativos y amenazas naturales. Adicionalmente, sirve en una visión general a colaborar con los siguientes temas:

- Control de procesos constructivos
- Aseguramiento de la calidad
- Verificación de diseño
- Evidencia para buen recibo
- Gestión de riesgos
- Protección de activos
- Asignación de riesgos y responsabilidades
- Reaseguros
- Investigación

2.2 Objetivos

- Proporcionar datos para tomar decisiones informadas como parte integral de actividades de construcción
- Entregar datos que evidencien y confirmen la calidad de los materiales y de la ejecución por parte de la mano de obra o para demostrar el cumplimiento del debido proceso
- Validar suposiciones o predicciones hechas durante el diseño verificando que sea apropiado mediante la toma y análisis de datos.
- Confirmar que un proyecto se está entregando de acuerdo con los requisitos del cliente, basados en los resultados del monitoreo.
- Proporcionar datos que pueden usarse como apoyo para contingencias a los riesgos asociados.
- Proporcionar datos para cumplir objetivos de investigación predefinidos.
- Integrar de la mejor manera posible las tecnologías electrónicas de SHM dentro del nuevo SIGP, conscientes de que esta disciplina cuenta con herramientas avanzadas que permiten

mediciones objetivas y precisas permitiendo evaluar la condición, desempeño estructural y operacional de los puentes de manera mucho más confiable.

- Lograr que el SIGP cuente con herramientas tecnológicas que una vez implementadas permitan mejorar el conocimiento de la condición y desempeño estructural de los puentes que gestiona, tanto en su condición actual como su desempeño en el mediano y largo plazo.
- Presentar de manera sucinta los pasos necesarios para el diseño y especificación de un sistema de monitoreo en el cual sea muy claro el flujo de información entre los módulos del SIGP, desde la definición de la condición a evaluar hasta los aportes al módulo 3 que se utilizarán en el módulo 5 de toma de decisiones.

2.3 Terminología y definiciones

Se presenta a continuación los principales términos y definiciones relacionadas con la presente guía.

Acondicionamiento	El acondicionamiento de señal es el proceso por el cual se lleva a cabo por un dispositivo o instrumento llamado acondicionador de señal. Este se encarga de convierte un tipo de señal eléctrica o mecánica en otro. El objetivo del acondicionador es amplificar la señal y convertirla a otro formato que sea compatible con otros dispositivos de adquisición o control. Además de la conversión, muchos acondicionadores de señal tienen otras funciones como linealización, amplificación, filtrado, evaluación y funciones inteligentes, interfaces entre otros.
ADC	La conversión análoga a digital (ADC por sus siglas en inglés) se utiliza para convertir una señal que se encuentra en el tiempo a una representación aproximada en el dominio digital.
Amplificador	Un amplificador es un dispositivo que, a partir de energía externa, magnifica la amplitud de un fenómeno, generalmente este concepto se utiliza en electrónica, pero también se aplica para mecánica, neumática e hidráulica.
Anti Alias	El filtro anti-alias o anti-aliasing hace referencia a un filtro pasa bajos analógico que se utiliza para limitar el rango de frecuencias de una señal antes de pasar por el ADC.
Devanado	El devanado hace referencia a un trozo alambre conductor aislado enrollado sobre un núcleo de algún material ferromagnético o conductor como la ferrita o el hierro.
Filtro	En electrónica, un filtro es un elemento que permite pasar y rechazar señales eléctricas para determinadas frecuencias o gama de frecuencias que pasan a través de él.
Inductancia	Es una magnitud física que indica la capacidad que tienen un inductor de generar inducción magnética, se representa con la letra “L” y se mide como la

EN PROCESO DE ADOPCION

relación entre el flujo producido por un circuito y la intensidad que puede circular.

Linealidad	En electrónica, la linealidad hace referencia al comportamiento de entrada contra salida, si la salida es una proporción de la entrada en todo el rango, se dice que este es lineal
Permeabilidad	Hace referencia a la capacidad que tienen algunos materiales para magnetizarse cuando se colocan en un campo magnético.
Procesamiento de Señales	Es una disciplina de la rama de la ingeniería electrónica, vinculada a la computación y la matemática aplicada. Se ocupa de la adquisición, detección, representación, transformación, análisis e interpretación de señales digitales y analógicas.
Reflexión	La reflexión hace referencia al cambio de dirección de un rayo de luz incidente en una superficie, esta puede regresar por el mimo medio o en diferentes direcciones dependiendo de la superficie.
Reluctancia	La reluctancia está asociada a la resistencia que ejerce un circuito ante un flujo magnético. Esto quiere decir que el circuito se resiste el paso del flujo magnético, oponiéndose con su propia fuerza magnetomotriz.
Resistencia	En electrónica la resistencia eléctrica es una magnitud que mide la dificultad que tiene un conductor para conducir la corriente eléctrica.
Resolución	La resolución hace referencia a la mínima variación de la magnitud que se está midiendo. Dicho de otra forma, la resolución indica el valor mínimo que debe cambiar la señal para que el instrumento detecte un cambio.
Sensor	El sensor es un dispositivo capacitado para detectar estímulos externos físicos o químicos y convertirlos a una señal eléctrica detectable por sistemas de adquisición.

2.4 Normas técnicas y referencias de monitoreo e instrumentación

En la Tabla 2-1 y Tabla 2-2 se presentan las principales referencias nacionales e internacionales consultadas en forma detallada para la concepción del submódulo de monitoreo e instrumentación, donde se estudiaron diferentes aspectos relacionados con los fundamentos y sus aplicaciones.

Tabla 2-1. Referencias nacionales

Entidad oficial	Entidad ejecutora	Tipo de publicación	Referencia
Instituto Nacional de Vías (INVIAS)	Pontificia Universidad Javeriana	Libro	(Muñoz et al., 2012)

EN PROCESO DE ADOPCION

e Ingeniería Nacional			
Instituto Nacional de Vías (INVIAS)	Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica	Norma	(INVIAS/AIS, 2014)
	Universidad Industrial de Santander	Artículo	(Parra, 2010)
Instituto Nacional de Vías (INVIAS) e Ingeniería Nacional	Pontificia Universidad Javeriana	Artículo	(Muñoz et al., 2010)
	Universidad de Valle	Articulo	(Marulanda et al., 2000)
Instituto Nacional de Vías (INVIAS) e Ingeniería Nacional	Pontificia Universidad Javeriana	Artículo	(Muñoz et al., 2008)

EN PROCESO DE ADOPCION

En la Tabla 2-2 se presentan las principales referencias internacionales consultadas en forma detallada para la concepción del submódulo Monitoreo y SHM.

Tabla 2-2. Referencias internacionales

Entidad oficial	País	Referencia
Canadian Network of Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures - ISIS (2001)	Canadá	(CANADA-ISIS, 2003)
International Standard ISO 14963:2003/18649:2004	Austria	Mechanical Vibration – Evaluation of measurement results from dynamic test and investigation on bridges
Federation internationale du Beton Fib CEB – FIP (2003)	Suiza	(FIB-CEP-FIP, 2003)(CANADA-ISIS, 2003)
International Standard ISO 13822:2010	Austria	Bases for design of structures — Assessment of existing structures
Federal Highway Administration - FHWA (2012)	USA	(Aktan et al., 2002)
Queensland Department of Transport and Mains Roads (2015)	Australia	(Rooke, 2005)
International Standard ISO 2394:2015	Austria	General principles on reliability for structures

EN PROCESO DE ADOPCION

CAPÍTULO

3

3.SISTEMAS DE MONITOREO

En la Figura 3-1 se presentan los componentes de un sistema general de monitoreo, que es aplicable a la de un puente y está compuesto por cinco grupos: sensores, conectividad de sensores, adquisición de datos y registro, comunicaciones y sistema de gestión de datos.

Un sistema de instrumentación puede ir desde una instalación con unos pocos sensores que entregan la información en mismo lugar de su montaje y por un tiempo corto, hasta un sistema distribuido, permanente, sobre muchas estructuras a lo largo del país y que concentra la información en varios nodos distribuidos a lo largo de geografía y en uno principal en donde se tendría la información necesaria para la toma de decisiones a diferentes niveles. Los componentes principales de estos cinco (5) grupos se explican a continuación.

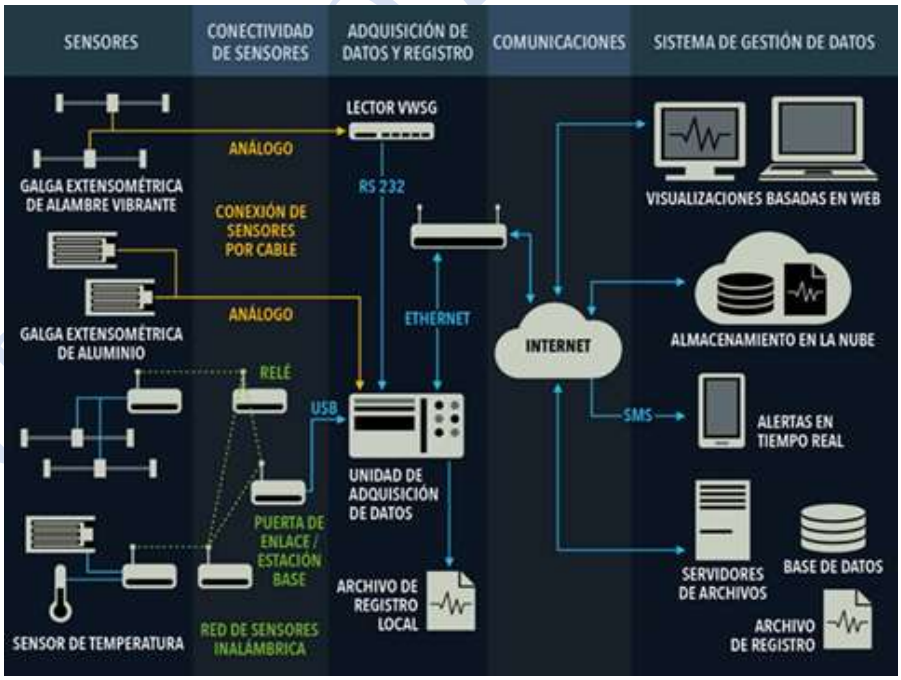


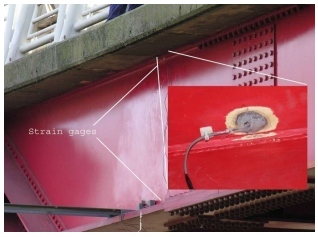
Figura 3-1. Componentes generales de un sistema de monitoreo. Fuentes: Adaptada de (Campbell R. Middleton, Paul R. A. Fidler, 2016)

3.1 Sensores

El sensor o transductor se define como "*un dispositivo que proporciona una salida utilizable en respuesta a un mensurando específico*". Un sistema electrónico de digitalización de señales es una variable eléctrica, ya sea corriente o voltaje, por lo cual es necesario tener un elemento que produzca una variación eléctrica relacionada con las variables físicas a medir.

El uso depende de las condiciones físicas de la medida y las especificaciones de rango dinámico y ancho de banda de la señal de interés. En la Tabla 3-1 se presentan los sensores típicos a utilizar en función de las variables a medir, donde se incluyen aplicaciones en puentes de algunos de ellos.

Tabla 3-1. Sensores típicos para utilizar.

Variables para medir	Sensor	Aplicación en puentes
Desplazamiento	Linear Variable Differential Transformer (LVDT) Galgas largas de fibra óptica (interferometría) Acelerómetros e integración numérica (señales transitorias) Triangulación de laser ópticos Sensor de cuerda vibrátil	
Velocidad	Acelerómetros e integración numérica (señales transitorias) Geófonos Micrófonos	
Aceleración	Acelerómetros piezoeléctricos Acelerómetros capacitivos Acelerómetros de equilibrio de fuerzas	
Elongación	Galgas extensiométricas eléctricas resistivas Rejilla de Bragg de fibra óptica	
Fuerza	Galgas extensiométricas eléctricas resistivas (celdas de carga) Piezoeléctricos	

EN PROCESO DE ADOPCION

Temperatura	Termómetros de resistencia eléctrica Termocuplas Termistores Sensores basados en fibra óptica	
Humedad	Sensores MEMS	

Por ejemplo, para medir temperatura se utilizan transductores de los siguientes principios físicos, especialmente:

- Potencial eléctrico generado en uniones metal-metal. Efecto Seeback. Termopares.
- Cambio en la resistencia del material.
- Cambio de potencial eléctrico en junturas semiconductoras.
- Medición con sensores sensibles a infrarrojo lejano.
- Cambios dimensionales sobre elementos calibrados.

Como se ve existe una amplia variedad de técnicas y principios físicos que son aplicables al proceso del transductor, cual usar dependerá de los criterios que tenga el experto en instrumentación y que se basará en los requerimientos de la variable a medir, las condiciones de instalación, tiempos de funcionamiento y protocolos aplicables si es del caso. Para los criterios de la selección de los sensores existen diferentes referencias, una de ellas es (Aktan et al., 2002), que los clasifica en tres grupos: las características de desempeño, restricciones ambientales y consideraciones económicas. En la Tabla 3-2 se presentan dichos criterios para cada grupo:

Tabla 3-2. Criterios de selección de sensores. Fuente: (Aktan et al., 2002)

EN PROCESO DE ADOPCION

Características de desempeño del sensor	Restricciones ambientales	Consideraciones económicas
Sensibilidad	Rango de temperatura	Costos
Resolución	Rango de humedad	Disponibilidad
Discriminación	Tamaño	Confiabilidad
Rango	Embalaje	Facilidad de instalación
Linealidad	Aislamiento	Necesidades para adquisición de datos
Histéresis	Efectos térmicos	
Exactitud		
Error		
Precisión		
Estabilidad		
Tiempo de respuesta		
Frecuencia de respuesta		

EN PROCESO DE ADOPCIÓN

Tabla 3-3. Criterios de selección de sensores (Parte 1). Fuente: (Aktan et al., 2002)

Valor medido	Tipo de sensor	Rango de medición	Resolución	Linealidad	Suministro	Rango de frecuencia	Influencias
Desplazamiento	LVDT LVDT Calibrado Triangulación sensores Transductor con cable de extensión	1-50 mm 1-50 mm 2-200 mm.50- 40000 mm.	1‰ mr 1‰ mr 1‰ mr	0.1% mr 0.1% mr 0.3% mr 0.05% mr	AC/DC AC/DC DC DC	0Hz-0,1kHz 0Hz-0,05kHz 0Hz-10kHz 0Hz-0,5kHz	fuerzas cortantes medición de frecuencia superficies reflectantes, suelo fuerzas cortantes
Inclinación	Nivel de burbuja Péndulo	±10 grad. ±1 grad.	1‰ mr 1‰ mr	0,1 grd 0,05% mr	DC DC	0,5 Hz 0,5 Hz	Vibraciones
Asentamiento	Sistema de nivel hidrostático PSD	0-60 mm. 0-90 mm.	0,01mm < 0,05 mm	<1% mr	DC DC	Estático 0Hz-0,5kHz	Presión atmosférica Gradiente de temperatura Humedad

Tabla 3-4. Criterios de selección de sensores (Parte 2). Fuente: (Aktan et al., 2002)

Valor medido	Tipo de sensor	Rango de medición	Resolución	Linealidad	Suministro	Rango de frecuencia	Influencias
Deformación unitaria – strain	Strain gauges FBG Fabry-Perot sensor fibra Sistema SOFO cuerda óptica	1-10000 µm/m ±10000 µm/m ±5000 µm/m 0.5% longitud del sensor 0.5% longitud del sensor	1µm/m 1µm/m 1µm/m 2µm/m	<1% <1%	DC/AC luz laser banda ancha luz blanca luz laser luz laser	0Hz-100 kHz 0Hz-100 kHz 0Hz-1kHz Estático 0Hz-0,1kHz	ΔT, fuga ΔT, esfuerzos transversales ΔT esfuerzos transversales
Aceleración	Piezoeléctrico Sensor MEMS A460 B12	±100 g ±1 g ±20g	10µg 5µg	<1% <1% <1%	DC DC AC	0,1Hz - 2kHz 0Hz-0,25kHz 0Hz - 0,1kHz	Fijación
Velocidad de vibración	Geófono Vibrómetro láser	100 mm/s 10 m/s	5µm/s 1µm/s	< 1% < 1%	DC/AC	4Hz - 1kHz 1Hz-20kHz	Fijación
Temperatura	Termo cuplas Pt 100	-185 a 300°C -200 a 600°C	50µV/K 400µV/K	1 % <1%	DC		Guías Gradientes de temperatura

3.1.1 Medición de desplazamiento

Se trata de determinar cuál ha sido el movimiento relativo entre elementos de una estructura; cuál es la distancia que se ha movido un punto respecto al otro. Se pueden tener mediciones del orden de unos pocos micrómetros hasta de decenas de centímetros, según el punto de la estructura que se desea medir. Como se trata de mediciones sobre elementos de gran masa como vigas, losas, cimientos y columnas, el método de medición depende de las condiciones de instalación y los valores máximos esperados de este desplazamiento y la resolución efectiva con la cual desea medirse. Se presentan algunos sensores para este tipo de medición

3.1.1.1 Medida de desplazamiento por elementos resistivos

Este método de medición consiste en tener un contacto deslizante sobre una superficie resistiva, puede ser lineal como se observa en la Figura 3-2. Estos elementos de medición están diseñados para tener una vida útil de miles o millones de ciclos. Los rangos de medición van desde unos pocos milímetros a decenas de centímetros e inclusive metros. Un punto del potenciómetro se fija a la referencia y el otro a al punto que se desea medir. Para más información sobre sensores de desplazamiento resistivo se recomienda (Buchman et al., 1999).

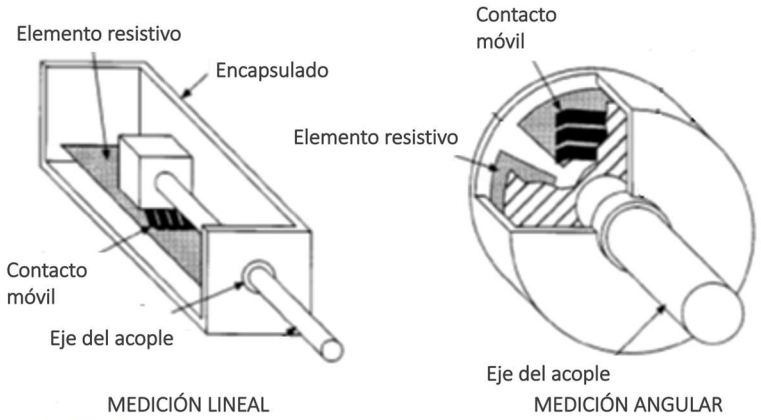


Figura 3-2. Medidores de desplazamiento resistivo.

En la Figura 3-3 se observa un medidor de desplazamiento resistivo lineal típico de distancia media utilizado para aplicaciones como diagnóstico de carga en puentes, Estructuras móviles, evaluación de componentes mecánicos y pruebas de laboratorio entre otros. En la Figura 3-4 se observa un potenciómetro de cable, se utiliza generalmente para puertas levadizas, puentes móviles para carreteras y ferrocarriles, equipos industriales entre otras. En la Figura 3-5 se observa un potenciómetro para medir distancias pequeñas, se usa para diagnóstico de cargas en puentes, prueba de estructuras de control en ríos, apertura de grietas, movimiento de la jaula de expansión, entre otros.

Figura 3-3. Imagen medidora de desplazamiento resistivo lineal típico, tomado de (BDI, 2020c).

Figura 3-4. Potenciómetro rotacional para medir distancia, tomado de (BDI, 2020a).

Figura 3-5. Potenciómetro para medir distancias pequeñas, tomado de (BDI, 2020b).

Este método ofrece como ventajas la simplicidad del acondicionamiento de señal y entrega un voltaje proporcional al desplazamiento. La desventaja se da debido al contacto mecánico entre el elemento resistivo y el contacto móvil, esto hace que tenga un tiempo de vida limitado por los ciclos mecánicos que soporta.

3.1.1.2 Medidores de desplazamiento inductivos

Este tipo de sensores se basa en principios de cambio de propiedades magnéticas en sistemas de núcleo magnético móvil y configuraciones de bobinas acopladas a este núcleo, en Figura 3-6 se observa la representación de un sensor de reluctancia, esta muestra dos núcleos, uno fijo con una bobina y otro móvil.

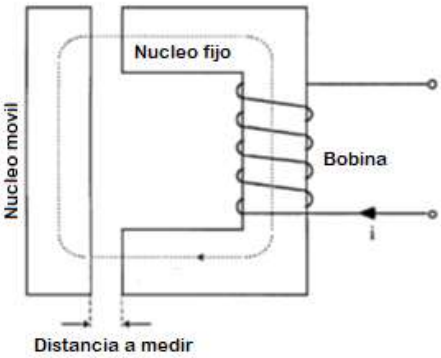


Figura 3-6. Sensor de reluctancia variable.

EN PROCESO DE ADOPCION

El sistema se basa en la medición de los cambios en el circuito magnético al desplazar el material del núcleo móvil respecto al núcleo fijo, Esto crea una separación de aire. El aire al tener una permeabilidad cercana a la del vacío y más pequeña que el material del núcleo cambia apreciablemente la reluctancia del circuito magnético y por lo tanto la inductancia del devanado.

Las ventajas que tiene este sistema es su larga vida útil debido a que no tiene contactos mecánicos, funciona para desplazamientos pequeños del orden de milímetro, sin embargo, presenta comportamiento no lineal que es necesario compensar.

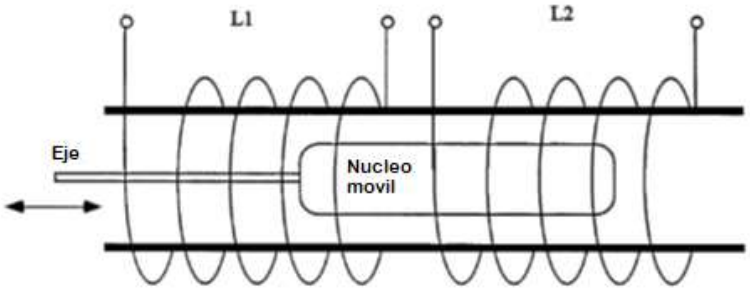


Figura 3-7. LVIT.

Otros sensores con un principio muy similar son conocidos como LVIT. (Linear Variable Inductive Transducer). En donde el núcleo móvil se desplaza entre dos devanados, cuando está en el centro, las impedancias L1 y L2 son iguales (Ver Figura 3-8), si se desplaza de este punto las impedancias cambian de forma lineal dentro de un intervalo definido. Midiendo ese desbalance de impedancias se puede determinar la posición del núcleo. Estos sensores funcionan para la medición de desplazamiento de unos pocos milímetros a unos pocos centímetros.

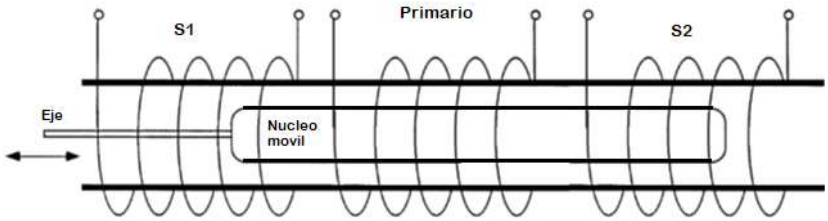


Figura 3-8. LVDT.

Hay otro sensor cuya construcción es muy similar al LVIT, el LVDT (Linear Variable Diferential Transformer) tiene un tercer devanado colocado entre los dos devanados, este actúa como devanado primario de un transformador, al aplicar un voltaje AC este induce voltaje a los dos devanados laterales y dependiendo de la posición del núcleo se ve una señal AC diferente en la salida (ver Figura 3-8). Este tipo de medidor de desplazamiento es muy robusto en condiciones extremas de funcionamiento, soporta altas o bajas temperaturas, trabajo a presiones hidrostáticas altas, es tolerante a radiaciones ionizantes y opera en vacío debido a que solo consiste en metal y alambre conductor.

Puede venir en una gran variedad de presentaciones que están diseñadas para algunas aplicaciones específicas. En la Figura 3-9 se observan algunos LVDT´s y LVIT´s

Figura 3-9. Algunas presentaciones de LVIT y LVDTs, Tomado de (Hbm.com, 2020)

Para los LVDT la electrónica de acondicionamiento es compleja y costosa. Actualmente están construyendo estos sensores con la electrónica de acondicionamiento incorporada para su uso en lugares donde las condiciones ambientales no son extremas. Lo denominan LVDTs DC el cual entrega un voltaje proporcional al desplazamiento y no exige un acondicionamiento de señal. Algunas aplicaciones de este tipo de sensor en puente de Colombia se muestran en la Figura 3-10 y la Figura 3-11:

Figura 3-10. Uso de un LVDT para medir las deformaciones unitarias del cordón superior de un puente peatonal durante una prueba de carga

Figura 3-11. Uso de un LVDT de hilo para medir deformaciones verticales de un puente férreo.

Otro método de medición es el desplazamiento por corrientes de Eddy, se basa en el cambio de impedancia de una bobina por las corrientes inducidas en materiales conductores que se acercan a la bobina activa que genera al campo magnético AC. Se utiliza para medir desplazamientos del orden de micrómetros, puede ser costoso y la electrónica de acondicionamiento es compleja, en la Figura 3-12 se observa el esquema de funcionamiento del sensor por corrientes de Eddy, adicionalmente se observa un sensor inductivo, el cual se basa en el principio de corrientes inducidas diseñado para la medición de desplazamiento, distancia, posición y vibración sin contacto.

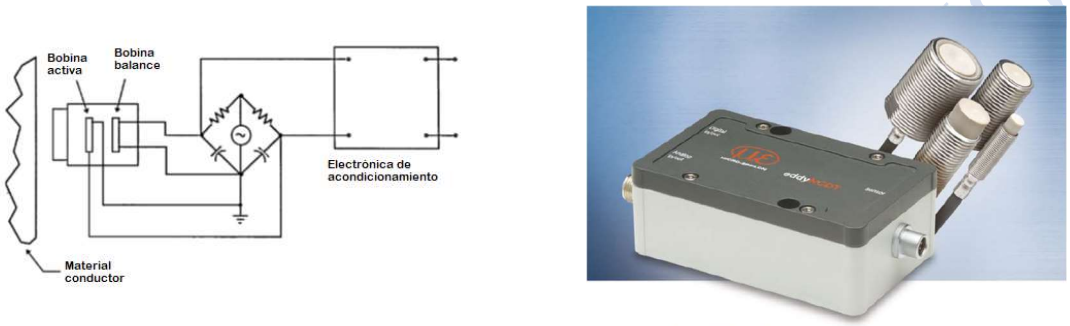


Figura 3-12. Medidor de desplazamiento por corrientes de Eddy, tomado de (Micro-epsilon, 2020b)

3.1.1.3 Medidores de desplazamiento por efecto capacitivo

Este método de medición se basa en determinar los cambios de impedancia de elementos capacitivos al cambiar la distancia entre placas de un condensador. Su valor depende del área de la placa, el valor del dieléctrico y la separación de placas. De esta forma se puede determinar el cambio de distancia entre las placas de forma muy precisa y se pueden lograr mediciones con resolución por debajo de los nanómetros. En la Figura 3-13 se observa un típico sistema de medición capacitivo junto a algunos sensores que se puede contactar. Este principio de medición de cambios en la capacidad eléctrica entre placas es la base de muchos sensores a nivel de micromecánica. (MEMs).

Figura 3-13. Medidores de desplazamiento por principio capacitivo, fuente (Micro-epsilon, 2020a)

EN PROCESO DE ACTUALIZACIÓN

3.1.1.4 Medición con fibra óptica y rejilla de Bragg (FBG - Fiber Bragg Grating)

El principio de medición de este método es la construcción de un filtro óptico cuya longitud de onda de rechazo o reflexión, depende de un patrón que tiene una periodicidad espacial en el índice de refracción que se determina en la fabricación de la fibra óptica. Cuando la fibra óptica es deformada uniformemente a lo largo del FBG, la periodicidad espacial del índice de refracción cambia por esta deformación, modificando la longitud de onda en el filtro óptico (Ver Figura 3-14). Finalmente, lo que se mide es cuanto cambió la periodicidad en la FBG al medir la longitud de onda de luz que se refleja. Por lo que el método mide el desplazamiento o deformación que tiene el segmento de fibra óptica con FBG.

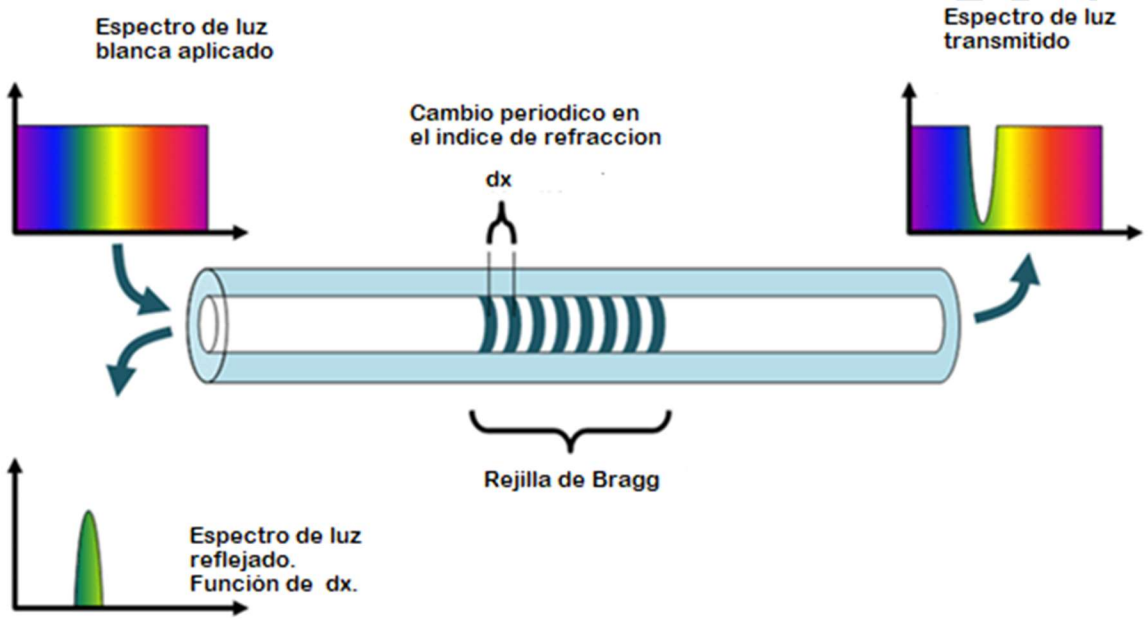


Figura 3-14. Principio de medición por FBG, adaptado de (Hitech, n.d.)

En la fabricación de las FBG se pueden colocar diferentes distancias entre los cambios de índice de refracción, para que cada sensor funcione a diferentes longitudes de onda, esto permite colocar varias medidas sobre la misma fibra óptica (multiplexación).Tiene ventajas ya que tiene gran inmunidad a interferencias eléctricas y no requiere alimentación en los puntos de los sensores, no da frecuencias de datos muy grandes, pero esta tecnología está en una etapa en la cual se está bajando precios, tanto en los sensores como en los interrogadores. En la Figura 3-15 se observa la presentación de un equipo de medición por FBG junto a diferentes sensores disponibles que usan en esta tecnología.

Figura 3-15. Equipos para medición con FBG, tomado de (HBM, 2020b)

Esta tecnología mide desplazamientos en el orden de los nanómetros o micrómetros, por su principio de funcionamiento se comporta como una galga extensiométrica, en donde finalmente la medida entregada corresponde a deformación unitaria (strain): dL/L.

En la Figura 3-16 se presenta una aplicación de acelerómetros de fibra óptica, que se instalaron en varios sitios incluyendo los tirantes.

Figura 3-16. Acelerómetros de fibra Óptica para el puente Pumarejo. Fuente:(Rehabtec, 2020)

3.1.1.5 Medición por galgas piezo-resistivas. (galgas extensiométricas)

El transductor consiste en una película conductora que forma un patrón de líneas en la dirección que se desea medir la deformación. Esta película presenta una resistencia asociada a la condición sin deformación. Para tener una medición se debe pegar el sensor a un elemento de prueba para que se deforme solidariamente con él. Al deformarse la galga cambia su resistencia eléctrica que está asociada a la deformación unitaria a la que está sometida el elemento de prueba.

En la Figura 3-27 se observa el esquema de la galga piezo-resistiva, en ella está el elemento piezo-resistivo donde se aplica una fuerza al elemento a medir haciendo se genere una deformación.

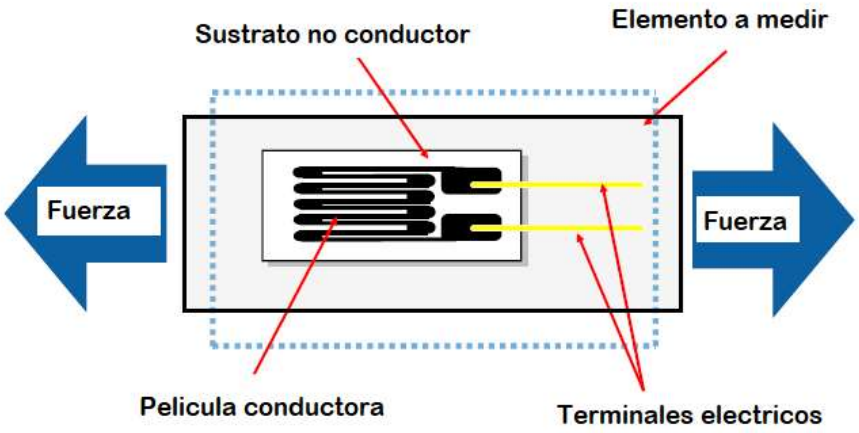


Figura 3-17. Esquema funcionamiento galga piezo-resistiva

Si se conoce las características mecánicas del material sobre el que se instaló se pueden determinar desplazamientos, fuerzas, esfuerzos, aceleraciones y otros parámetros físicos asociados deformaciones. Esta es una de las razones por la cual muchos tipos de transductores están basados en el uso de galgas piezo-resitivas. Existen una gran variedad de formas tamaños y arreglos de estos sensores que se adaptan a muchas de las necesidades de medición en estructuras.

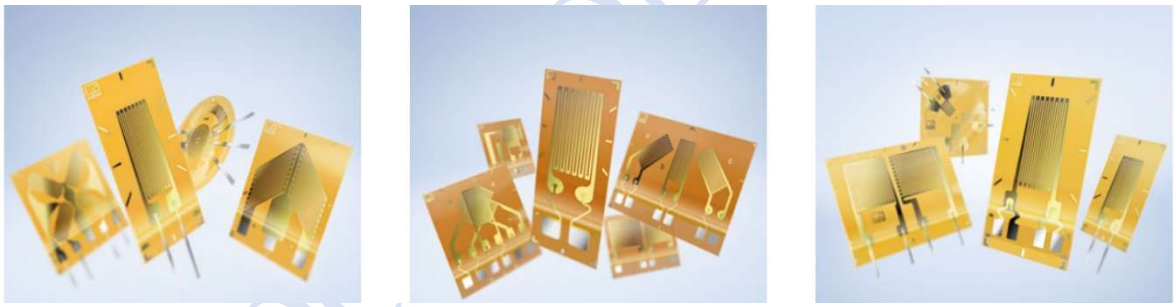


Figura 3-18. Ejemplos de galgas extensiométricas, tomado de (HBM, 2020a)

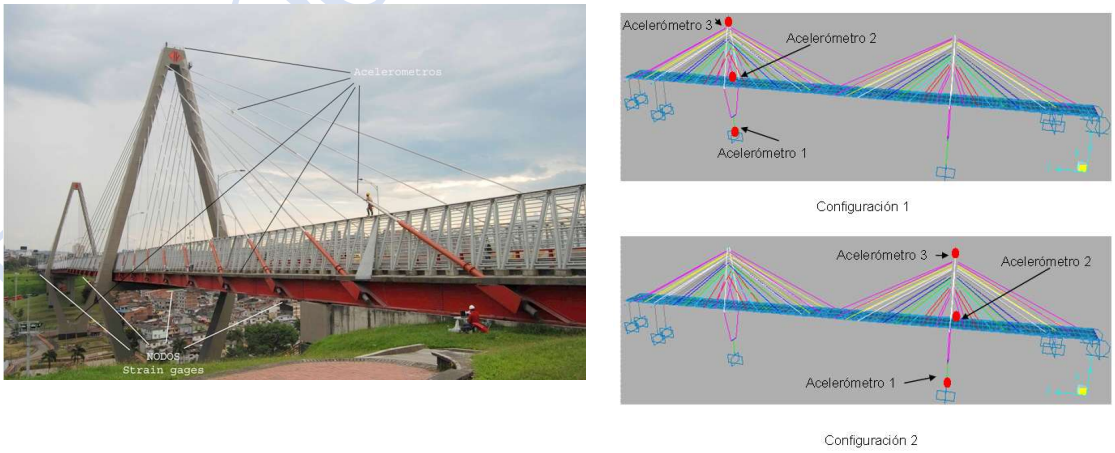
En la Figura 3-18 se observan diferentes diseños de galgas extensiométricas los cuales tienen diferentes formas de medición y características, permitiendo un amplio rango de aplicaciones entre las que se encuentra el monitoreo de estructuras. Adicionalmente en la Figura 3-19 se muestra un sensor que de forma indirecta mide desplazamiento empleando en su interior galgas extensométricas.

Figura 3-19. Medidor de desplazamiento basado en galgas extensiométricas, tomado de (HBM, 2020c)

Estos sensores miden desplazamiento del orden de micrómetros, son ampliamente usados por su costo bajo, requieren diferentes electrónicas de acondicionamiento y post-proceso según sea la variable que se desea medir y el montaje mecánico sobre el cual se ubiquen.

3.1.2 Vibraciones en estructuras

Cuando se desea estudiar el comportamiento dinámico de un puente es necesario determinar su frecuencias naturales y modos de vibración basados en vibraciones ambientales o forzadas. Su comportamiento se basa principalmente en su rigidez y masa, como también el tipo de superestructura, su parte estática y constructiva, tipo de apoyo y los de fundición y subestructura. Una aplicación es la evaluación dinámica que se realizó del puente Dosquebradas como se observa en la Figura 3-20, el cual se instrumentó con acelerómetros uniaxiales en cada una de los dos pilones.



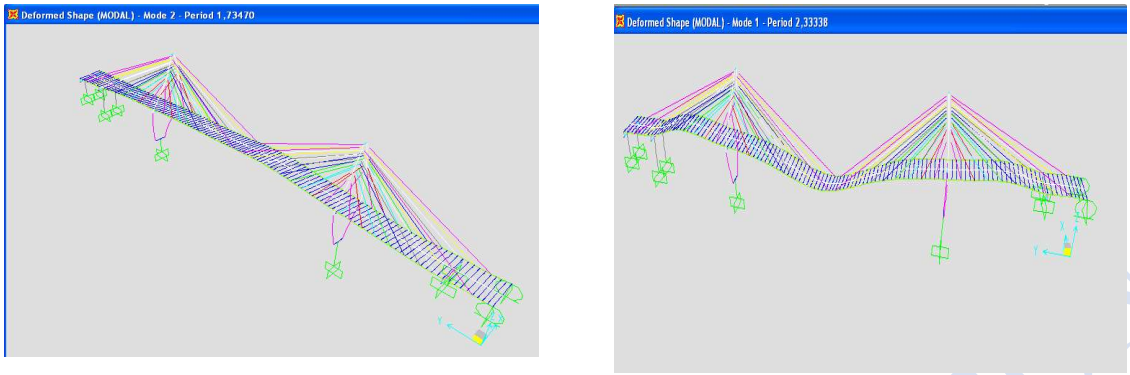


Figura 3-20. Ejemplo de instrumentación para evaluación de dinámica del puente Dos Quebrada. Fuente: (INVIAS/PUJ, 2008)

Los análisis se pueden realizar en el dominio del tiempo, determinado magnitudes de la vibración, coeficientes de amortiguamiento o en dominio de la frecuencia determinando frecuencias de oscilación, ya sean naturales o forzadas. Para esto lo que debe determinarse son las medidas básicas de la física mecánica: desplazamiento, velocidad y aceleración.

3.1.2.1 Geófono

Los geófonos consisten en sensores que miden la velocidad de movimiento del elemento que está instalado. Su funcionamiento consiste en sistema, imán – masa- bobina, que entrega una señal de voltaje proporcional a la velocidad entre el imán y la bobina. Estos sensores tienen una muy buena sensibilidad, pero su respuesta a baja frecuencia se debe tener en cuenta, ya que en algunas estructuras las respuestas dinámicas esperadas están en estos rangos.

3.1.2.2 Acelerómetros

El principio básico de los acelerómetros utilizados en infraestructura es medir el efecto de reacción sobre una masa de prueba con algún tipo de medidor de strain o conversión directa de fuerza a una variable eléctrica. Existe una amplia gama de acelerómetros con diferentes tecnologías y rangos de medición en amplitud y frecuencia. El criterio de selección es muy variado y depende del tipo de puente. Según (DEVELOPMENT, 2007), el acelerómetro es probablemente el sensor más utilizado para mediciones de vibraciones mecánicas. Esto se debe a portabilidad, facilidad de instalación y gran rango de frecuencia utilizable o ancho de banda. Los acelerómetros están diseñados para ser sensibles a fuerzas inerciales, y por ende a vibraciones ambientales.

El diseño común de un acelerómetro consiste en una llamada masa sísmica que está unida a un soporte elástico (viga, membrana, etc.). Cuando se somete a aceleraciones, la masa sísmica produce una fuerza de inercia significativa que actúa sobre el soporte elástico. Esta fuerza es igual al producto de la masa sísmica y la aceleración. Debido a esta fuerza, el componente mecánico comienza a vibrar con respecto a la carcasa de los acelerómetros. Esta vibración se captura con componentes de detección y se transforma en una señal de salida del sensor. En la Tabla 3-5 se muestran los principales tipos de acelerómetros y sus especificaciones.

EN PROCESO DE ADOPCIÓN

Tabla 3-5. Principales tipos de acelerómetros y sus especificaciones.

Tipo	Especificaciones	Esquema o foto
Acelerómetros tipo MEMs	• Rango de medida (±) (g): 2 • Respuesta en frecuencia (Hz): 0-200 • Tecnología: MEMS DC • Numero de ejes: 3 • Sensibilidad: 1000 mV/g	
3.1.1.1.1 Acelerómetro piezo-electricos.	• Rango de medida (±) (g): 4000 • Respuesta en frecuencia (Hz): 0.5-10000 • Tecnología: PE Charge • Número de ejes: 1 • Sensibilidad: 5.6 pC/g	
3.1.1.1.2 Acelerómetros IEPE.	• Rango de medida (±) (g): 0.5 g • Respuesta en frecuencia (Hz): 0.05-450 • Tecnología: Piezo eléctrico, IEPE. • Número de ejes: 1 • Sensibilidad: 10 V/g	

Cada uno de estos acelerómetros requiere módulos de acondicionamiento diferentes que tienen características que están orientadas a aplicaciones muy particulares, por lo que hay que ser muy cuidadoso al seleccionar un sensor de este tipo (Véase (Eren, 2017))

3.1.2.3 Desplazamiento en función del tiempo

En el caso que se requiera información dinámica a partir del desplazamiento en función del tiempo, cualquiera de los sensores que mencionamos anteriormente puede ser útil, para lo cual se debe revisar los rangos de desplazamiento requeridos.

EN PROCESO DE ACTUALIZACIÓN

3.1.3 Inclinación

Se trata de medir al cambio que hay de un elemento en la estructura con respecto a la vertical, es decir su rotación. Los elementos más utilizados en este caso son sensores tipo MEMs, que ofrecen una sensibilidad y fácil instalación. Se basan en medición de las fuerzas generadas por la gravedad sobre una masa a nivel elementos de microelectromecánica (MEMs), o el balance de una masa por medios electromagnéticos para garantizar que esté en el punto de equilibro.

Estos sensores pueden ser de uno o dos ejes de medición y la interfaz para medición puede ser analógica o digital. La resolución de estos sensores puede llegar del orden de unas milésimas de grado (Véase (SINGER, n.d.)). En la Figura 3-21 se presentan algunos de estos tipos de sensores.

Figura 3-21. Algunos tipos de inclinómetros de dos ejes.

En la Figura 3-22 se presenta el uso de este tipo de sensor, para verificar la rotación de la estructura durante una prueba de carga.

EN PROCESO DE PUBLICACIÓN

Figura 3-22. Inclinómetro instalado en baranda de puente para medir pendiente curvatura en una prueba de carga

3.1.4 Temperatura

Los sensores más comúnmente usados en infraestructura son el tipo RTD y termopares. Los RTD se basan en el cambio muy preciso de la resistencia eléctrica en función de la temperatura y los termopares se basan en efecto seeback. Lo más importante para selección de estos sensores es la forma de instalación o los puntos de medición deseados. Pueden estar embebidos en el concreto, pavimento o instalarlo para medidas superficiales en los puentes. En la Figura 3-23 se presentan estos tipos de sensores, donde se observa la gran variedad de formas o empaques que se adaptan a diferentes condiciones de instalación.

EN PROCESO DE PUBLICACION

Figura 3-23. Variedad de empaque de sensores de temperatura que se adaptan a diferentes condiciones de medición.

Un ejemplo es la instrumentación realizada en el puente Unete (Arco atirantado), donde se instalaron sensores de temperatura para la corrección de las deformaciones unitarias dadas por las galgas extensiométricas, como se observa en la Figura 3-24.

EN PROCE

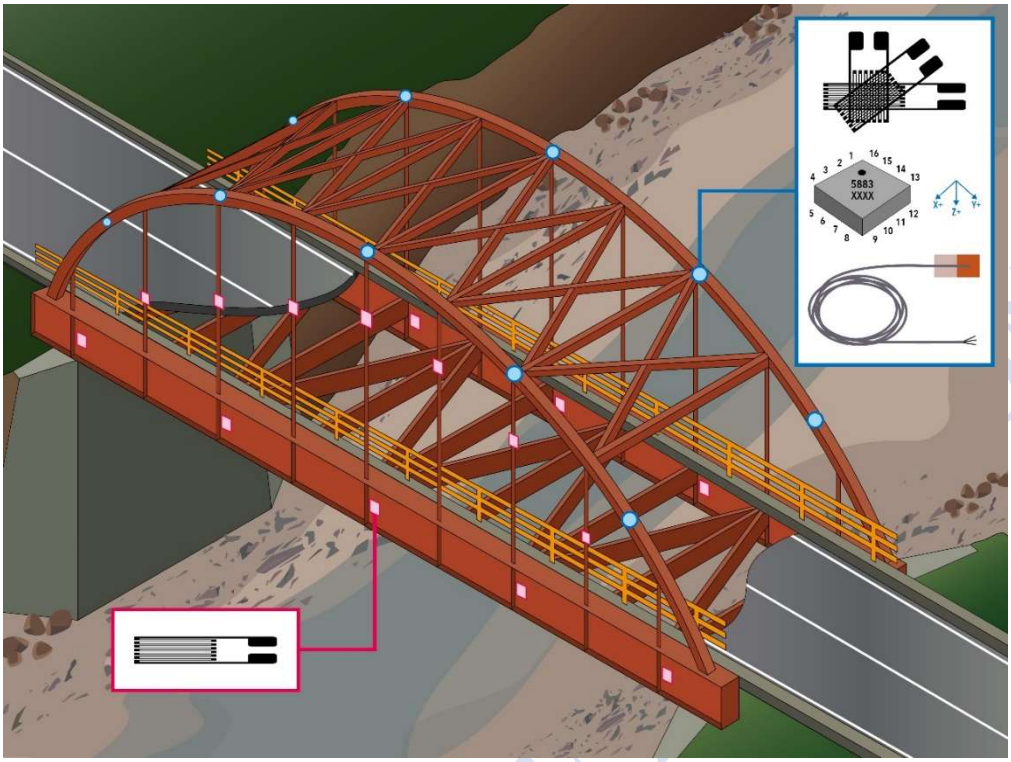


Figura 3-24. Instrumentación proyectada para el puente Únete. Utilización de sensores de temperatura.

También es aplicable para instalarse durante la construcción y operación en puentes de voladizos sucesivos. Sirve como información para el control geométrico y para las deformaciones que sufre durante su operación.

3.1.5 Cargas estáticas y dinámicas

3.1.5.1 Celdas de carga

Las celdas de carga son una herramienta útil para el control de la fuerza de tensionamiento, (Arcas, 2008)así como de la fuerza remanente tanto en anclajes al terreno como en obras de postensado. El artículo revisa los motivos por los que se instalan células de carga, los tipos de células de carga existentes y sus ventajas e inconvenientes. Se presentan también datos reales comparando los valores medidos con células de carga de los que se extraen del uso de gatos hidráulicos (Véase (Monitor, 2010) y (Arcas, 2008)). Se presenta en la Tabla 3-6 un cuadro con las ventajas y limitaciones de los tres tipos de estas celdas:

EN PROCESO DE PUBLICACIÓN

Tabla 3-6. Ventajas y limitaciones de celdas de carga. Fuente: Adaptada de (Arcas, 2008)

Tipo de celda	Ventajas	Limitaciones
Hidráulica	Tamaño compacto y puede ser de lectura directa o con transductor eléctrico	Menor exactitud y sensible a efectos térmicos. Exactitud en máquina de ensayo. No son adecuadas para aplicaciones dinámicas (con muchas lecturas por segundo). Deben leerse sensor por sensor Pueden dañarse por sobretensiones Exactitud en máquina de ensayos = ± 0,5 % F.E.
Cuerda vibrátil	Los efectos de temperatura son pocos significativo. La variable a medir se relaciona con una señal salida sinusoidal en donde la información es enviada al cambiar su frecuencia, esto permite transmitir la señal a través de largas longitudes de cable si verse afectada por la influencia del agua o humedad. Sensores robustos, fiables	No son adecuadas para aplicaciones dinámicas (con muchas lecturas por segundo). Deben leerse sensor por sensor Pueden dañarse por sobretensiones Exactitud en máquina de ensayos = ± 0,5 % F.E.
Bombas extensiométricas	Efectos de temperatura compensados. Adecuada para aplicaciones dinámicas. (elevada frecuencia de datos. Facilidad en la toma de lecturas (Una única lectura por celda)	Menor exactitud Sensible a efectos térmicos Exactitud en máquina de ensayos = ± 1 % F.E.

Estas celdas de carga han sido utilizadas especialmente en los tirantes de los puentes atirantados, tales como Pumarejo, Honda e Hisgaura. En la Figura 3-25, Figura 3-26 y Figura 3-27 se presentan tipos de estos dispositivos de celdas de carga, incluyendo cuando se verificó la fuerza de uno de los tirantes para el puente Dos Quebradas.

EN PROCESO DE ADOPCION

Model

NZS-FBG-ALG

Figura 3-25 Celda de carga de tirante.

Figura 3-26 . Anclaje destapado para la medición de la tensión de tirante. Fuente: (INVIAS/PUJ, 2008)

Figura 3-27 . Gato Monotorón VSL para realizar la prueba de tensión. Fuente: (INVIAS/PUJ, 2008)

3.1.5.2 Pesaje en movimiento

Es un tema que ha avanzado mucho en los últimos años y tiene amplia aplicación en los temas de transporte, pavimentos e ingeniería de puentes. Basados en las siguientes referencias ((FHWA, 2016), (Al-Qadi et al., 2016), (ASTM E 1318, 2002) y (Lydon et al., 2015), se hace una definición y descripción del mismo. El sistema de pesaje en movimiento WIM es el proceso de medir las fuerzas dinámicas de los neumáticos de un vehículo o camión en movimiento. Los primeros sistemas de WIM en puentes (BWIM) utilizaban plataformas flotantes de concreto reforzado incrustados en las vías y soportadas en sus esquinas por celdas de carga de galgas extensométricas y las medidas eran obtenidas tomando fotos de los rastros de los vehículos desde un osciloscopio. Los sistemas BWIM modernos "*utilizan sistemas de detección precisos para transformar un puente existente en un mecanismo para determinar la carga de tráfico real*." Estos sistemas utilizan las medidas de deformación del puente

en tiempo real, para estimar las características del tráfico real. "*La principal ventaja del sistema es su implementación no destructiva y su capacidad para proporcionar datos de tráfico completamente imparciales*."

Uno de los problemas que enfrentan los BWIM, es la necesidad de un sistema de detección de ejes para una medición completa, y la dificultad de implementar uno de estos sistemas. "*Se reconoce ampliamente que cualquier forma de detección de ejes en la superficie de la carretera no es ideal para aplicaciones B-WIM ya que puede causar interrupciones al tráfico*". Idealmente, se buscaría un sistema "sin nada en la carretera" y esto implica instrumentar el tablero del puente con sensores adicionales para detectar picos de ejes en lugar de usar sensores en la superficie de la carretera". Este tipo de sistemas ha resultado efectivo en puentes de losa delgada, sin embargo, para puentes de losas y vigas, los picos axiales pueden ser confundidos con los picos generados por la vibración de vehículos o del mismo puente. Para dar solución a este problema, se han propuesto sistemas de visión, así como nuevos sensores de deformación de cortante. A la vez, se han propuesto nuevas locaciones para los sensores como posible solución. Las aplicaciones en Colombia se han concentrado en los sistemas ITS a nivel de las concesiones y la que se tiene proyectado por parte del INVIAS para el 2021. Se aplican en los peajes y en los sistemas de control de pesaje en las vías.

3.2 Sistemas de adquisición de datos

Para entender la problemática de la adquisición de señales se deben aclarar algunos conceptos involucrados en este proceso y que permiten definir un sistema de adquisición. El proceso de adquisición consiste en llevar al "mundo digital" una variable física con toda la información que sea requerida para su análisis y para presentarla en unidades de ingeniería. Para poder especificar las características que debe tener este sistema debemos considerar los factores que están involucrados en este proceso. Lo primero que debemos definir son las características que se requieren obtener de la señal física de interés: Intervalos de amplitud y de frecuencia. La amplitud nos da información sobre los niveles que puede tener esta señal, pero también es importante definir otras características con la que deseamos medir esta señal, ya que esto tiene un gran impacto en todo el sistema de adquisición.

Repetitividad: La variación de un conjunto de medidas tomadas en un corto plazo.

Reproducibilidad: La variación del conjunto de medidas sobre un periodo largo de tiempo.

Precisión: Define que tanto se acercan los datos tomados al valor real de la variable medida.

En la Figura 3-28 se ilustran estos conceptos, el centro del blanco es el valor real de la variable y los "dardos" corresponden a las medidas tomadas. La dispersión, estadísticamente descrito por la varianza, es menor en al caso (a), pero la media se acerca más al valor real de la variable en el caso (b), aquí podemos decir que la medida en (a), es más repetible y que la medida en (b) es más precisa sobre la media.

EN PROCESO DE ADOPCION

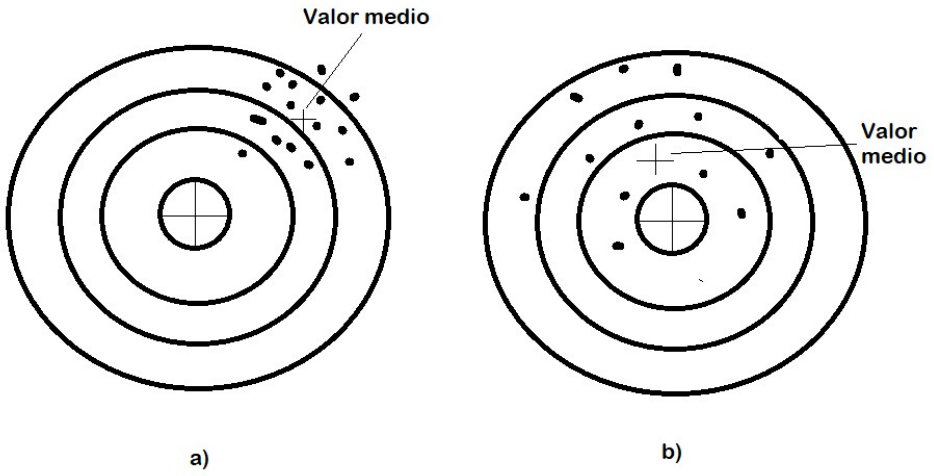


Figura 3-28. Figura descriptiva de Repetitividad, Reproducibilidad y Precisión (a) Medida más repetible. (b)Medida más precisa

Resolución: Es el mínimo cambio detectable en la señal. No necesariamente está asociado a tener una buena repetividad o precisión. Generalmente se especifica como número de bits en los cuales se entrega la medida, (8, 10,12, 16 o 24 bits), o como relación entre la máxima señal esperada y la mínima detectable, 1:1000, 1:10000.

En el proceso de adquirir y digitalizar de una señal están involucrados muchos conceptos matemáticos de proceso de señales y consideraciones prácticas de implementación que afectan el desempeño del sistema, los requerimientos para tener una instrumentación son diferentes si es una señal estática, varia muy lentamente, o dinámica, se debe medir en una banda de frecuencias, también se debe considerar si hay presencia de ruido; que ocurre si los procesos no son lineales y otros múltiples factores que son del ámbito de conocimiento del experto en instrumentación.

Para profundizar en estos temas se recomienda (Buchman et al., 1999; Kester, 2004). En la Tabla 3-3 y Tabla 3-4 se presentan algunos criterios para la selección de sensores, que incluye rango de medición, resolución, linealidad, suministro, rango de frecuencias e influencias.

Los sistemas de adquisición de datos son los equipos que se encargan de recopilar, procesar, sincronizar y almacenar de forma digital la información proveniente de los sensores, en un caso general los sistemas de adquisición de datos pueden estar distribuidos sobre una red local y recibir o digitalizar la información para concentrarla en un computador local o remoto según sea la configuración del sistema. Pueden recibir la información de varias formas:

- Maneja directamente la señal proveniente de los sensores por medio de módulos especializados para cada tipo de transductor, se encarga de acondicionar la señal del transductor, algunos de los equipos o módulos especializados y los sensores que manejan directamente son:
    - Módulos Temperatura
        - RTD
        - Termopar
        - Termopares infrarrojos.
    - Módulos para strain-gauges.
        - Celdas de carga.
        - Medida directa de strain.
        - Piezómetros.
    - Módulos para acondicionamiento de sensores piezoeléctricos.
        - Strain piezoeléctrico.
        - Acelerómetros.
        - Desplazamiento.
    - Módulos para acelerómetros IEPE.
    - Módulos para sensores de cuerda vibrátil.
        - Strain.
        - Piezómetros.
        - Celdas de carga.

- Tiene módulos de digitalización con entrada de corriente o voltaje, que se utilizan cuando el sensor ya tiene un acondicionamiento de señal, sea que este empacado con el mismo sensor o con el módulo de acondicionamiento separado del sensor. Generalmente cumplen con unos estándares como 4-20mA, 0-10 V.

- Recibe los datos por interfaz de comunicaciones digital. Cada vez el más común que los sensores incorporen acondicionamiento de señal, digitalización y comunicaciones digitales en un solo paquete, por esto el sistema de adquisición de datos debe tener la posibilidad de manejar una serie de protocolos de comunicación para contemplar la conectividad que pueden ofrecer este tipo de sensores como:

    - Interrogadores para fibra óptica.
        - Strain.
        - Aceleración.
        - Desplazamiento.
        - Inclinómetros.
    - Magnetómetros.
    - Sistemas de pesaje.
    - Estaciones meteorológicas.
    - Medidores de nivel.
    - Sistemas de emisión acústica.

EN PROCESO DE ADOPCION

Para esta guía se establece que el sistema de adquisición de datos está limitado al entorno de la estructura a monitorear y se encarga de concentrar y sincronizar toda la información que proviene de todos sensores. La configuración del sistema de adquisición puede ser muy variada: integrar sensores de varios fabricantes, puede tener redes locales de comunicación entre sus componentes, puede estar distribuido o concentrado. Su topología puede ser muy variada dadas las condiciones físicas de la estructura, los requerimientos de los datos a obtener, las condiciones de tiempo y lugar de la toma de datos.

En la Figura 3-29 se muestran ejemplos de estos sistemas de adquisición de datos utilizados en puentes de Colombia.

Figura 3-29 Algunos sistemas de adquisición (diferentes marcas) de datos empleados para la instrumentación de puentes en Colombia

3.2.1 Componentes básicos de un sistema de digitalización

En la Figura 3-30 podemos ver los elementos que encontramos en el proceso de digitalización, estos son:

- Variable física para medir. Señal para digitalizar.
- Transductor.
- Acondicionamiento de señal.
- Filtro anti-sobrelapamiento (*anti-alias filter*).

- Convertidor analógico a digital, ADC. Muestreo – cuantización.
- Almacenamiento.
- Proceso digital.

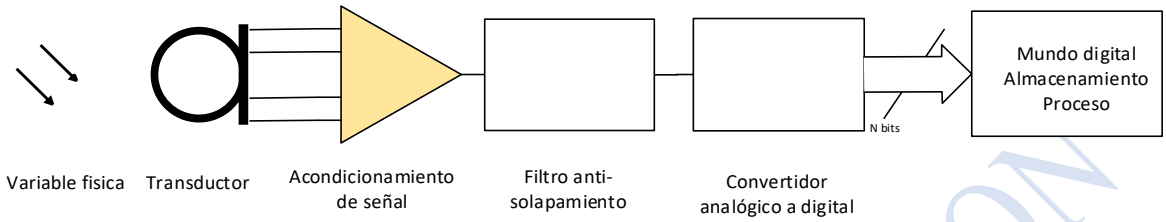


Figura 3-30. Elementos claves de un sistema de datos muestreados

3.2.1.1 Acondicionamiento de señal

Cada transductor tiene unos principios físicos de conversión que permite a partir de una variable física cualquiera pasar a un potencial eléctrico o una corriente. En general se debe pasar ese cambio producido en el transductor a unos intervalos de voltaje de entrada al ADC en unos valores definidos por la electrónica requerida en el ADC: 0 a 5V, 0 a 3.3V, -5 a +5V, etc.

Además, se requiere en la mayoría de los casos, suministrar una señal eléctrica al transductor para que este funcione y tener un acople de impedancia eléctrica adecuado entre el transductor y la electrónica de amplificación para obtener la medida correcta.

Siguiendo el ejemplo del transductor para medir temperatura si utilizamos un termopar tipo K (Véase (Omega, n.d.-b)), entrega un voltaje de unas pocas millonésimas de voltio por cada °C de diferencia entre la temperatura de referencia y la de la juntura de medida. Para esto se requiere un amplificador que lleve este voltaje al nivel requerido en el ADC que son de Voltios y sumarle el valor de la temperatura de referencia.

Si se utiliza una PT100 (Véase (Omega, n.d.-a)), que es una resistencia que varía de forma muy definida con la temperatura, el acondicionamiento es diferente, se puede pasar una corriente muy precisa a través del transductor, amplificar los cambios de voltaje para que se adapte a los requeridos en el ADC.

Finalmente, en este ejemplo los voltajes que entran al ADC son los mismos en los intervalos de medición requeridos, sin importar que la electrónica de acondicionamiento es diferente para cada transductor.

Para cada transductor es necesario tener una electrónica de acondicionamiento, en el estado actual de la técnica es cada vez más común encontrar la electrónica de acondicionamiento “empacada” con el transductor.

3.2.1.2 Muestreo y cuantización

Cuando se va a digitalizar una señal se realizan dos procesos, el muestreo que toma información de la amplitud de la señal de entrada cada cierto tiempo, llamado tiempo de muestreo Ts, o frecuencia de muestreo 1/Ts; el segundo proceso, cuantización, en donde se pasa de una señal con valores

EN PROCESO DE ADOPCION

infinitos posibles de voltaje en un intervalo a una representación con un número finito de posibles valores.

La primera operación, el muestreo, define el ancho de banda posible de representar de la señal de entrada, que está limitado en condiciones ideales por el teorema de Nyquist a la mitad de la frecuencia de muestreo (Véase (Instruments, 2019) y (Kester, 2004)).

La cuantización entrega como resultado de la conversión un número finito de niveles representados en valores que corresponden al número de bits del ADC n,

Así con 8 bits se tendrán 256 niveles, 10 bits 1024 niveles, 12bits 4096 niveles, 16 bits 65636 niveles, la salida del ADC corresponde a una salida de un numero entero entre 0 y $2^n - 1$.

El número de bits del ADC se puede asociar a la resolución deseada en condiciones ideales de conversión, pero se puede ver degradada en condiciones de ruido eléctrico debido a las instalaciones de los transductores, problemas con los amplificadores de acondicionamiento o de una mala utilización de los filtros anti-alias.

3.2.1.3 Filtro anti-sobrelapamiento. (Anti-alias filter)

Como se mencionó en el punto anterior, la frecuencia de muestreo Fs, limita el ancho banda posible de representar, de forma ideal, a la mitad de su valor, pero esto solo funciona si el ancho de banda de la señal de entrada está restringido por debajo de la mitad de la frecuencia de muestreo, es decir no se debe permitir el paso de señales mayores a la mitad de la frecuencia de muestreo, ya que se distorsionarán, introducirán ruido a la muestra adquirida en la banda deseada. Esta es la función de este filtro. Algunos fabricantes de equipos de instrumentación y transductores ofrecen estos filtros que pueden ser particularmente críticos en pruebas de tipo dinámico en donde se correlacionan varias señales y que deben utilizados según sean las necesidades de la prueba.

3.2.1.4 Procesamiento y almacenamiento

Cuando se obtiene la señal del ADC, que corresponde a un valor entero, esta debe asociarse a la variable de ingeniería deseada, ya sea por una ecuación, tabla de linealización o por un proceso matemático digital para extraer la variable física de los datos adquiridos. Por ejemplo, si se mide velocidad de aire o de partículas usando ultrasonido y efecto Doppler, se deben realizar cálculos para asociar los cambios de presión acústica medidos por el transductor en una fase o cambio de frecuencia que finalmente está asociada a la velocidad que se desea determinar, la salida del sistema de medición de velocidad es la señal procesada.

Ahora, que se tiene la variable medida, se debe almacenar o desplegar para que el experto realice el análisis correspondiente para cumplir con el objetivo que propuso al medirla.

EN PROCESO DE ADOPCION

3.3 Pruebas sin contacto

3.3.1 Medición de distancia por tiempo de vuelo. (ToF, time of flight)

En los casos presentados de sensores requieren estar en contacto mecánico con los elementos a medir y funcionan en distancias entre centímetros y nanómetros. En muchos casos es necesario medir distancias del orden de metros a centenas de metros dada la ubicación de los puntos a medir y la imposibilidad de instalar elementos mecánicos de medición entre los puntos de interés. El método se basa en medir el tiempo que tarda una onda, ya sea mecánica o electromagnética, en alcanzar un objetivo y regresar al punto de emisión. Se transmite un pulso o serie de pulsos y se toma el tiempo de regreso de onda como indicador de la distancia a la que se encuentra el objeto. Todos estos métodos se pueden aplicar a nivel de un solo punto de medición en el caso más simple o reconstrucción de imágenes 3D a partir de la información obtenida en cada uno de los métodos descritos.

3.3.2 LIDAR (Light Detection and Ranging)

Este principio la onda que se envía es un pulso muy corto de luz, puede ser generado por un láser, este llega al objetivo, se refleja y es detectado en el punto de emisión para calcular la distancia al tener la velocidad de propagación en el aire (Ver Figura 3-31). Este principio es utilizado en estaciones de topografía en donde se requiere un prisma como objetivo para garantizar precisiones del orden de milímetros en su medición.

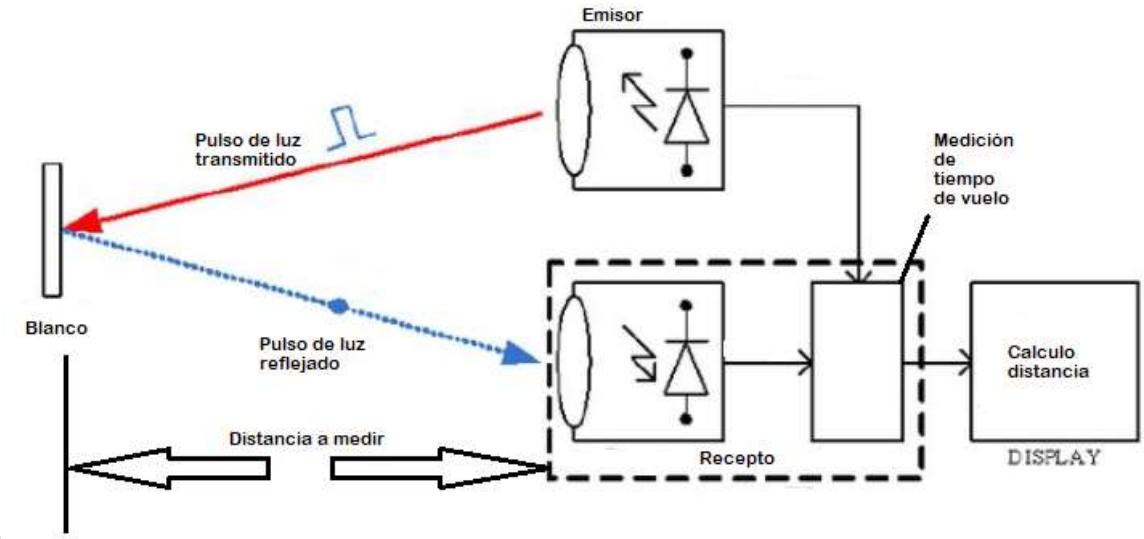


Figura 3-31. Esquema funcionamiento Lidar (Light Detection and Ranging)

Sin embargo, esta tecnología está en rápido desarrollo y aplicando este mismo principio, pero con barridos del haz de laser sobre los objetivos a medir y modelos computacionales se pueden obtener se pueden imágenes 3D de los elementos de interés. La precisión de estos sistemas puede estar del orden de milímetros con superficies reflectoras como blanco o del orden de centímetros en superficies naturales, pero con alcances de centenas de metros.

3.3.3 SONAR (Sound Navigation and Ranging)

En este caso la señal que se envía hacia el objeto que se desea medir es una onda acústica que se refleja y llega de nuevo al punto de emisión. Esta onda puede propagarse en aire, en agua o en sólidos. Se debe tener en cuenta que la longitud de onda asociada a la onda acústica determina el tamaño mínimo del objeto que se desea detectar. En el caso de monitoreo de infraestructura, se utiliza para determinar niveles de láminas de agua en ríos cuando se utiliza en aire.

Se utiliza para obtener los perfiles de causes al medir la profundidad del lecho al propagarse la onda en el agua, también puede determinar la velocidad del flujo por efecto doppler. Cuando se utiliza en solidos se pueden determinar espesores de elementos metálicos o de concreto al reflejarse la onda emitida en los límites del material.

3.3.4 RADAR (Radio Detection and Ranging)

Aquí el principio de medición son ondas de radio emitidas hacia el objeto de interés, estas se reflejan y se puede determinar la distancia a la que se encuentra, como es el caso de medición de niveles de agua y velocidad superficial en cauces como se muestra en la Figura 3-32. En monitoreo de infraestructura se utiliza para laderas con alto riesgo de colapso (Véase Figura 3-33).

Figura 3-32. Medición de nivel del río.

EN PROCESO DE ADOPCION

Figura 3-33. Sistema de RADAR para monitoreo de ladera, tomado de *(Groundprobe, n.d.)*

3.3.5 Correlación Digital de Imágenes

Este método hace parte de los métodos ópticos de estimación de desplazamiento, en el caso más simple, dependerá solamente de la instalación de una cámara de video en una ubicación con vista a la zona en la cual se va a realizar la medición, otras implementaciones requerirán de un patrón de medición ubicado directamente en la zona en la cual se quiere realizar la medición, Este patrón actúa en conjunto con la cámara de video y debe ser visto por la cámara con una resolución mínima dada por el fabricante del sistema (Ver (Potter & Setchell, 2014), (Setchell & Sharam, 2020)).

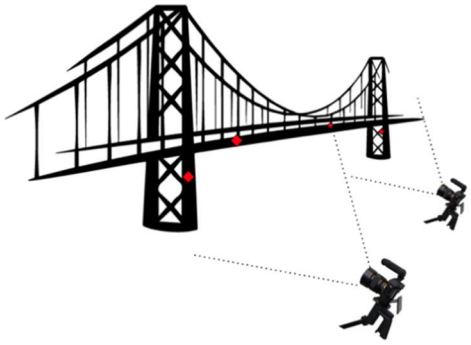


Figura 3-34. Esquema montaje para mediciones con cámaras.

EN PROCESO DE ADOPCION

Los marcadores en rojo en la Figura 3-34 pueden o no requerirse dependiendo de la tecnología que se use en el sistema. Las cámaras deben estar fijas y revisar los marcadores hasta una cierta distancia dada por la resolución a la que se quiera usar el sistema, de ser necesario se debe aumentar el número total de cámaras si el área a medir es muy grande.

Las cámaras deben ubicarse en una zona firme, cada cámara solo será capaz de visualizar un área dependiendo de la resolución deseada, mientras más grande sea el área que la cámara supervisa, menor la resolución sobre el marcador (Chen et al., 2009).

En este tipo de métodos (Ver Figura 3-34), primero de debe ubicar la cámara en una zona estable, ya que cualquier movimiento puede generar ruido en la medición, la cámara de video entonces tomará una secuencia de cuadros de video separados en tiempo de manera uniforme, la escena vista por la cámara debe coincidir con la superficie en la que se desea realizar la medición, la cantidad de puntos o zonas en las que se va a realizar la medición dependerá entonces del fabricante de su sistema. Este tipo de métodos funciona realizando una comparación cuadro a cuadro del desplazamiento ocurrido desde un cuadro base contra todos los demás, usualmente el cuadro base, es el primero desde que se inicia la medición.

En los métodos por correlación, la cámara debe ser calibrada inicialmente, el procedimiento detallado dependerá del fabricante de su sistema, pero debe incluir por lo menos una etapa en la cual se le defina al software la relación píxel/metro para su configuración actual. Para un correcto uso de su sistema esta calibración debe realizarse siempre que se mueva la cámara o cambie en más de un porcentaje, por ejemplo, un 0.1% de la distancia en línea recta desde la cámara al objeto que quiere medir (Iwamoto & Kanie, 2017).

Los métodos que operan por correlación digital de imágenes pueden estimar con efectividad la translación en los ejes paralelos al plano formado por el sensor de la cámara, sin embargo, no todos los sistemas comerciales soportan la estimación del tercer eje “z” o la estimación de la distancia entre la cámara y el objeto a ser medido, en caso de requerir esta medición, deberá confirmar con el fabricante del sistema utilizado si es posible realizar esta medida (Ferrer et al., 2016).

Si se cuenta con más de una cámara observando el mismo objeto los resultados pueden ser promediados temporalmente punto por punto siempre y cuando se cumplan dos restricciones:

- Los puntos son capturados en los mismos instantes de tiempo. Para esto debe solicitar al fabricante del sistema que realice un correcto guardado de los datos de medición junto con la hora actualizada y calibrada de cada medición.
- Las cámaras se encuentran correctamente calibradas y las mediciones están en las mismas unidades espaciales (m, cm, mm, pulgadas). Si estas están en pixeles no podrán ser promediadas, ya que las mediciones en pixeles deben ser corregidas usando una transformación lineal que depende de la geometría extrínseca del objeto a ser medido y de la ubicación de la cámara.

La precisión depende del área vista por la cámara, mientras menor sea el área del objeto visto por la cámara mayor será la resolución efectiva. Esta resolución efectiva debe calcularse a partir del manual

EN PROCESO DE ADOPCION

de implementación dado por el fabricante del sistema. Sin embargo, se deberían conocer previamente por lo menos dos de los siguientes parámetros para despejar los otros 2:

- Distancia a la cual se debe ubicar el sistema
- Lentes disponibles para su cámara.
- Resolución mínima requerida en la medición.
- Área en la cual requiere realizar la medición.

A partir de dos de estas, es posible calcular las otras dos.

En general pueden resumirse las siguientes ventajas y desventajas del uso de este tipo de métodos:

Ventajas:

- Facilidad de instalación.
- En algunos casos no requiere de ningún contacto con el objeto a ser medido. En otros solo requiere de un marcador que puede o no requerir alimentación de potencia externa.

Desventajas:

- Afectados por la iluminación, debe tenerse en cuenta que si el objeto medido cuenta con una textura tridimensional. La translación del sol puede generar afectaciones en la medición.
- Dependen de la estabilidad de la instalación de la cámara.
- Puede ser afectados por disturbios atmosféricos (corrientes de aire caliente, lluvia)

3.4 Sistemas de comunicación

La monitorización de sensores requiere una comunicación estable y segura, para lograr este propósito se requiere de un consenso en un modelo de comunicación que permita la inter-operatividad y permita una descripción general para cada protocolo. En este apartado se hace una descripción general del modelo OSI en el que se basan la mayoría de las redes de comunicación y se incluye una descripción y funcionamiento del protocolo de comunicación más utilizado para acceso a internet TCP/IP. A partir del modelo OSI (Ver (Information technology — Open Systems Interconnection — Basic Reference Model: The Basic Model, 1994)) y el protocolo TCP/IP (Ver (Institute, Information Sciences California, 1981)) se hace una descripción de los diferentes protocolos de comunicación utilizados en la instrumentación industrial y las tecnologías que apoyan las comunicaciones de corto, mediano y largo alcance.

La elección del sistema de comunicación se analiza en cuatro grupos principales que dependen de la distancia de la medición y del resultado que se espera, estos abarcan diferentes tecnologías y contempla características de los sensores disponibles en el mercado.

3.4.1 Modelo OSI

El modelo OSI se utiliza para la descripción de las comunicaciones de las redes, las cual no sería posible sin un grupo de reglas que permita la comunicación entre diferentes redes. A estas se les

EN PROCESO DE ADOPCION

conoce como el Protocolo de Control de Transmisión - Protocolo de internet (TCP/IP) y el Modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos o modelo OSI por sus siglas en ingles. El modelo OSI está conformado por siete (7) capas o niveles. Cada uno de estos niveles describe sus propias funciones. La separación en niveles hace posible la intercomunicación de protocolos distintos al concentrar funciones específicas en cada nivel de operación. En la Figura 3-35 se observa el nombre de cada capa y la secuencia que debe llevar para subir o bajar entre las capas del protocolo.

Figura 3-35. Niveles del Modelo OSI

3.4.1.1 Capa 1: Física

La capa física define las especificaciones eléctricas, mecánicas, de procedimiento, funcionales y la especificación de cuando se debe activar, mantener y desactivar el enlace físico entre los sistemas conectados. Las características como niveles de voltaje, temporización de cambios de voltaje, velocidad de datos físicos, distancias de máxima de conexión, conectores físicos y otros atributos similares son definidos por las especificaciones de la capa física.

3.4.1.2 Capa 2: Enlace

La capa de enlace de datos proporciona tránsito de datos confiable a través de un enlace físico, esto permite que las capas siguientes estén seguras de que la transmisión de datos a través del enlace físico se haga sin errores o disminuya los posibles errores. Esta capa se ocupa del direccionamiento físico, el acceso al medio, la detección de errores, la organización de las tramas y del control del flujo.

3.4.1.3 Capa 3: Red

La capa de red provee los medios funcionales y de procedimiento para que se haga la transferencia de tamaño variable de datos en secuencias, de un origen en un host que se encuentra en una red de datos para un host de destino que se encuentra en una red de datos diferente, tratando de mantener la calidad de servicio que habría sido requerida por la capa de transporte.

3.4.1.4 Capa 4: Transporte

La capa de transporte segmenta los datos de forma organizada en el equipo transmisor y los reensambla nuevamente en el equipo receptor. La capa de transporte suministrar un servicio de transporte de datos confiable entre los equipos conectados y se encarga de iniciar, mantener y terminar adecuadamente los circuitos virtuales.

3.4.1.5 Capa 5: Sesión

La capa de sesión se encarga de gestionar y finalizar la sesión entre dos equipos conectados, se encarga de sincronizar el diálogo entre las capas de presentación del transmisor y el receptor, y administrar el intercambio de datos de forma eficiente.

EN PROCESO DE ADOPCION

3.4.1.6 Capa 6: Presentación

La capa de presentación se encarga de garantizar que la información que envía la capa de aplicación de un equipo pueda ser leída por la capa de aplicación de otro. De ser necesario, la capa de presentación se encarga de convertir los formatos de datos en uno de uso común.

3.4.1.7 Capa 7: Aplicación

La capa de aplicación define los protocolos que emplean las aplicaciones para el intercambio de información y le permite acceder a los servicios de las demás capas, ejemplos de esta capa son el correo electrónico y el navegador WEB

3.4.2 Protocolo TCP/IP

Los protocolos TCP (Protocolo de Control de Transmisión) e IP (Protocolo de Internet) se originaron a principios de 1980 y fueron adoptados por la red ARPANET en 1983. El protocolo TCP/IP define las reglas que hacen posible la conexión entre computadores de diferentes fabricantes y diferentes tecnologías. La arquitectura para los protocolos basados en TCP/IP se forman en cuatro niveles o capas similares al modelo OSI.

3.4.2.1 Capa Red

Esta capa se asocia al medio de comunicación físico y de enlace, capas 1 y 2 del modelo OSI, incluye los drivers que controlan las tarjetas de red y gestiona de la conexión entre el hardware, los cables y los dispositivos de red. Los protocolos asociados a este nivel no pertenecen propiamente a TCP/IP pero son la base sobre el que éste se desarrolla.

3.4.2.2 Capa de Internet

La capa de Internet es análoga a la capa 3 del modelo OSI, se encarga del envío y recepción de los paquetes a través de la red, así como el enrutamiento por los diferentes caminos que puede usar para llegar a su destino. Los protocolos IP y ICMP generalmente se encargan de las tareas de esta capa.

3.4.2.3 Capa de Transporte

La capa de Transporte es análoga a la capa 4 del modelo OSI, se encarga de gestionar el flujo de datos entre el equipo trasmisor y el receptor. Existen dos protocolos para la trasmisión de datos, TCP es un protocolo fiable y orientado a conexión, mientras que UDP es un protocolo más simple que no garantiza la recepción de los datos y no está orientado a conexión.

3.4.2.4 Capa de Aplicación

La capa de aplicación es análoga a las capas 5,6 y 7 del modelo OSI, ésta gestiona las características de las comunicaciones que dependen directamente del aplicativo. Algunos ejemplos de TCP/IP son Telnet, FTP, HTTP, SMTP, SNMP, NFS, NNTP, entre otros

3.4.3 Comunicaciones locales

Las comunicaciones locales que se trata en este capítulo están limitadas a una detección de voltaje, corriente o nivel lógico que se encuentran a una distancia corta del rango de metros. Las señales

EN PROCESO DE ADOPCION

generadas desde un sensor o sistema de adquisición a una corta distancia llegan directamente al sistema de centralización de datos.

A continuación, se listan cuatro alternativas para comunicaciones de corto alcance, estas se utilizan principalmente para segmentos donde se puede llevar la señal directo a un módulo de adquisición de datos y se utilizan generalmente para la industria.

3.4.3.1 Corriente 4-20mA

El estándar 4-20mA nace de la aparición de la instrumentación neumática para realizar el manejo de las variables de los procesos (presión, caudal, temperatura, etc.) haciendo que el monitoreo y control dentro de la industria adquiriera autonomía y confiabilidad.

Un alambre por el que circula la señal aumenta su resistencia interna a medida que aumenta la distancia, para tramos cortos la resistencia en mínima y por tanto despreciable, sin embargo, para distancias largas la resistencia se vuelve un factor relevante haciendo que la medición de la señal se altere. Al utilizar el estándar 4-20mA permite compensar este defecto gracias a que la corriente en todo el segmento de cable es igual, permitiendo tramos más largos en comparación con la transmisión de voltaje.

Las ventajas que presenta son:

- Fácil de conectar y configurar
- Utiliza menos conexiones y alambre reduciendo los costos de instalación
- Es mejor para viajar largas distancias
- Menor sensibilidad a ruido eléctrico
- Fácil de detectar la perdida de señal o energía

Las desventajas que presenta son:

- Transmisión de un solo parámetro
- Susceptibilidad a los lazos a tierra
- Fuertes requisitos de aislamiento

Este sistema de transmisión se usa en casi todas las necesidades industriales, sin embargo, no se recomienda utilizarlo cuando son señales de pulsos o presión sin transmisores adicionales. Aunque se utiliza principalmente en la industria, este puede ser utilizado en diferentes campos como la medición de variables físicas para salud estructural.

3.4.3.2 Voltaje

Las mediciones de voltaje para comunicaciones se utilizan en gran variedad de sensores que tienen salidas con diferentes niveles de voltaje, permite la medición directa del sensor con una resolución que depende del conversor análogo a digital del sistema de adquisición y se utiliza para transmitir una señal análoga que permite controlar actuadores.

Las principales ventajas que presenta la transmisión de voltaje es su fácil implementación y la facilidad para detectar de errores utilizando un multímetro. Sin embargo, este tipo de señales son muy

EN PROCESO DE ADOPCION

susceptibles a perturbaciones electromagnéticas que provocan errores de medición. Para utilizar este tipo de transmisión, se deben utilizar cables apantallados para la protección. Las señales de 0…10V, 1…5V 1…10 V son muy frecuentes como valores nominales de motores, pero también se aplican en contados casos en sensores de temperatura y presión.

3.4.3.3 Digital

Este tipo de comunicación se utiliza estrictamente en sistemas donde su entrada o salida en una señal binaria, se usa para activar relevos, bombas de agua o cualquier dispositivo que trabaje únicamente en estados de encendido y apagado. La señal de salida de un sensor binario se encuentra en dispositivos de alarma como sensores de fuego, lluvia, presencia entre otros.

3.4.4 Comunicaciones de Campo

En la industria existen protocolo de comunicación que ayudan a disminuir la mano de obra requerida para implementar equipos industriales, con ayuda de comunicaciones digitales o interfaces físicas análogas se reduce considerablemente el uso de cables y mejoran la tolerancia a fallos. Estos protocolos no se limitan a la industria ya que se extiende su uso a áreas como la instrumentación de edificios, puentes o grandes estructuras.

A continuación, se listan algunos sistemas de comunicación utilizados en la industria junto a sus protocolos de comunicación más utilizados y algunas tecnologías emergentes aplicables a la necesidad de monitoreo de puentes.

3.4.4.1 Comunicaciones Industriales

Un bus de campo es un sistema full dúplex de transmisión digital de datos, está diseñado para conectar dispositivos de campo y sistemas de automatización como los PLC a una planta industrial. El bus de campo está diseñado para sustituir al sistema mencionado en Comunicaciones de Campo donde se utilizan cables directos a cada dispositivo. Un bus de campo transfiere información digital secuencias, por lo que se le denomina sistema de comunicación en serie.

3.4.4.2 Estándar RS232

La especificación RS232 ofrece un estándar de intercomunicación entre los DTE (equipos terminales de datos) y DCE (equipos de comunicación o de terminación de circuito de datos). La norma se ocupa de especificar los aspectos físicos y de control como se menciona en Capa 1: Física del modelo OSI. En este se especifica como son los niveles de tención de las señales transmitidas y la información de control que debe existir entre los equipos. RS-232 describe, además de las características eléctricas, mecánicas y funcionales.

Este estándar tiene como ventaja la gran variedad de equipos que soportan RS232 que al ser full dúplex permite el control total del equipo y el monitoreo, tiene una gran facilidad para convertir los niveles de voltaje y se puede reducir el número de líneas a Tx, Rx y GND. Las desventajas que presenta son baja tasa de transferencia de apenas 20kbps, solo se puede usar para comunicaciones punto a punto y como la señal va en forma de voltaje, está limitado por la calidad del cable y las interferencias en el medio.

EN PROCESO DE ADOPCION

3.4.4.3 Estándar RS485

Este estándar surgió a raíz de las desventajas del estándar RS-232 en aspectos como la velocidad de transmisión, inmunidad al ruido, longitud de conexión, y conexión multipunto. El estándar RS-485 tiene como principal característica la de funcionar con señales digitales de voltaje balanceado, evitando así problemas de referencia de niveles respecto a una tierra compartida lo que genera errores.

RS-485 es uno de los estándares más empleados en comunicaciones industriales debido a su robustez y sencillez para instalar, permite hasta 32 nodos en la misma red, siendo posible que todos los nodos trabajen como transmisores para el resto de los nodos, es decir, tiene capacidad multimaestro. Otra característica importante de RS-485 es el número de líneas de transmisión necesarios para implementar la comunicación las cuales disponen de dos posibilidades, emplear una única línea compartida para transmisión y recepción, o bien utilizar una implementación similar a RS-422, que permite transmitir y recibir al mismo tiempo, incrementando la velocidad de transmisión.

3.4.4.4 PROFIBUS

Este protocolo es el más utilizado en la industria y puede ser extendido a diferentes áreas gracias a su gran facilidad de uso y disponibilidad para diferentes sistemas de medición y control, utiliza tres variantes que se aplican dependiendo de propósito específico. PROFIBUS DP se utiliza para procesos distribuidos en automatización de maquinaria y procesos de manufactura en fábricas, es eficiente, rápido y económico; PROFIBUS FMS para automatización de propósito general, permite transferencia de hasta 1,5 Mbps; PROFIBUS PA para automatización de procesos en ambientes especiales como la industria química y petroquímica, seguridad y suministro de energía, soporta velocidad hasta de 31.2 kbps, mediante el uso de un cable de cobre de dos hilos.

3.4.4.5 MODBUS

Inicialmente fue implementado como un protocolo de cada de aplicación (IEEE Computer Society, 2007) con la finalidad de transmitir los datos a través de una comunicación serial. Con el tiempo se ha expandido para utilizar a través de protocolo serial, TCP/IP a través de UDP (Véase 3.4.2).

El protocolo MODBUS/TCP define un estándar para uso en la automatización industrial el cual el simple de implementar cuando el dispositivo soporta sockets a través de TCP/IP, el protocolo MODBUS se encapsula en una trama TCP que aprovecha las nuevas tecnologías de comunicación en todas las áreas que requieren comunicaciones de campo.

3.4.4.6 Ethernet

La especificación IEEE 802.3 Ethernet define el tipo de cableado y las características de la señal que transporta (IEEE Computer Society, 2007). En los años 70 se lograban velocidad máxima de 10 Mbps sin embargo los avances en la en la tecnología y en la fabricación de cables y conectores logra velocidad de 1000 Mbps a nivel comercial, algunas empresas de tecnología ya implementan las nuevas especificaciones que logra velocidades de hasta 10 Gbps.

Para lograr las velocidades mencionadas anteriormente, se requiere de cables de diferentes calidades, actualmente se utilizan cables UTP categoría 5e, según su especificación (Véase (Telecommunications Industry Association, 2001)) este cable soporta velocidades hasta 1000Mbps y

EN PROCESO DE ADOPCION

hasta 100 metros, si se requiere una mayor velocidad de transmisión es necesario subir a UTP Categoría 6 (Véase (ANSI/TIA, 2009)) la cual soporta hasta 1000 Mbps y hasta segmentos de cable de 100 metros.

3.4.4.7 WiFi

Wifi es un estándar diseñado para interconectividad en redes por medio de señales inalámbricas de área local o WLAN por sus siglas en inglés, la especificación de esta tecnología se puede encontrar en (IEEE Computer Society, 2007). Después de la revisión original, se realizaron revisiones que han permitido mejorar su confiabilidad y velocidad.

Desde la salida del estándar 802.11 han aparecido estándares derivados los cuales mejoran características para definir diferentes posibilidades dependiendo de la necesidad y buscando mejorar al estándar anterior. El estándar 802.11a fue el primer estándar, opera en la banda de 5GHz y permite velocidades de hasta 54 Mbps, tiene la desventaja de tener un bajo alcance debido a la excesiva atenuación en espacio ocasionado por la banda que utiliza. El estándar 802.11b mejora al estándar 802.1a, cambia a la banda de 2.4GHz y logra velocidades de hasta 11 Mbps teóricos, limitado a 50 metros de cobertura radial. Luego aparece 802.11g, este mantiene la misma banda de operación de 2.4 GHz, mejora la tecnología permitiendo mayor cobertura en espacios interiores y exteriores y logra velocidades de hasta 54 Mbps. Entre los estándares más utilizadas actualmente se encuentra la 802.11n que gracias a la tecnología MIMO logra velocidades de hasta 600 Mbps y hasta 120 metros en interiores y 300 metros en exteriores.

Las últimas tecnologías comerciales disponibles están referenciadas en el estándar 802.11ac el cual regresa nuevamente a la banda de 5GHz, pero gracias a su tecnología no pierde cobertura y logra velocidades de hasta 1300 Mbps teóricos, también llamado WiGig. Aunque las especificaciones de los nuevos estándares ya se encuentran en proceso y algunos aprobados, comercialmente no se encuentran estas tecnologías.

3.4.4.8 Redes de Sensores

Las tecnologías asociadas a Internet de las Cosas (IoT por sus siglas en inglés) recientemente han evolucionado y gracias al auge que tienen, se pueden encontrar en diferentes campos como la domótica, la automatización de edificios, censado de campos agrícolas, control de ganado entre otras. Uno de los campos donde se pueden aplicar las tecnologías asociadas a IoT es la monitorización de estructuras. Refiriendo específicamente a las comunicaciones de corto alcance existen dos tecnologías que permiten la comunicación nodo a central y nodo a nodo.

3.4.4.8.1 <u>Zigbee</u>

Una de las tecnologías más utilizadas en IoT es Zigbee, se caracteriza por el bajo consumo de energía, su topología en malla y su fácil integración. La especificación Zigbee trabaja bajo el estándar IEEE 802.15.4 (Véase (Society, 2020)) para redes inalámbricas de área local. Diseñada para trabajar en la banda de 2.4 GHz aunque la especificación incluye las bandas 915 MHz para América y 868 MHz para Europa. Soportar velocidad de transmisión de hasta 250kbps para la banda de 2.4GHz, 40kbps para la banda de 915 MHz y 20 kbps para la banda de 868 MHz. Debido a la baja potencia de

EN PROCESO DE ADOPCION

transmisión que puede emplear, solo tiene un alcance de 10 metros, pero se puede extender utilizando las estructuras en malla a través de nodos enrutadores.

El direccionamiento utilizado en Zigbee permite identificar de forma única hasta 65535 nodos divididos en *closters* de hasta 254 nodos permitiendo redes extensas para casi cualquier aplicación.

3.4.4.8.2 Bluetooth

La tecnología Bluetooth especialmente Bluetooth Low Energy (BLE) permite la implementación de sistemas para IoT gracias al bajo consumo energético. Al igual que Zigbee cumple con el estándar IEEE 802.15.4 para redes inalámbricas de área personal por lo que está limitado en algunas características de uso de espectro radioeléctrico. Bluetooth fue diseñado para trabaja únicamente en la banda de 2,4 GHz ayudando a la inter operatividad entre diferentes fabricantes.

Bluetooth se clasifica en cuatro categorías o clases segmentadas por la potencia de transmisión, la *clase 1* tiene un alcance de hasta 100 metros, con una potencia de transmisión de 100mW, la *clase 2* tiene un alcance de hasta 20 con una potencia de transmisión de 2.5 mW, la *clase 3* tiene un alcance de hasta 1 metro con una potencia de salida de 1mW, y la clase 4 tiene un alcance de hasta 0.5 metros con una potencia de transmisión de 0.5 mW.

El stack de Bluetooth permite configurar alternativas para cada objetivo particular. La topología punto-punto permite conectar dos dispositivos como un cable virtual, podemos verlo cuando un computador se conecta a un teclado Bluetooth. La topología uno-mochos que permite conectar un dispositivo a otros, esta forma la podemos ver cundo un teléfono se conecta con audífonos bluetooth y al mismo tiempo con un reloj inteligente. Por último, está la topología muchos-muchos la cual permite conectar múltiples dispositivos entre sí, formando una maya interconectada. Esta topología es especialmente útil para aplicaciones de IoT.

3.4.5 Comunicaciones de largo alcance

Las comunicaciones de largo alcance hacen referencia a los enlaces que permiten comunicaciones a más de 300 metros y van hasta varios kilómetros. Al igual que las comunicaciones de campo, se contemplan tecnologías dirigidas a la industria, pero con la posibilidad de implementarlas en diferentes áreas como el monitoreo de estructuras, y se contemplan tecnologías utilizadas para implementaciones en IoT.

3.4.5.1 LoRa / LoraWAN

LoRa es una tecnología de modulación de espectro ensanchado de chirp (CSS por sus siglas en inglés) diseñada para tener un ultra bajo consumo y soporte para comunicación de hasta 15 kilómetros, junto al protocolo LoRaWAN crean una arquitectura de comunicaciones para una gran cantidad de aplicaciones de IoT.

Entre las ventajas más relevantes de esta tecnología es su bajo consumo de energía que permite que la alimentación se haga a través de una batería y entrega autonomía de varios años, su gran alcance que en espacios abiertos puede llegar a los 15 kilómetros con una antena relativamente pequeña, y su bajo costo de fabricación permite integrar esta tecnología en casi cualquier aplicación. Como ventaja

EN PROCESO DE ADOPCION

para los desarrolladores, LoRa y LoRaWAN son tecnologías libres lo que permite bajar aún más los costos en la fabricación y la implementación en casi cualquier sistema compatible a nivel global.

Las limitaciones para lograr el bajo costo, consumo y gran distancia son la baja tasa de transmisión de datos que depende directamente de la distancia a la que se encuentra el módulo del sistema de recepción. Dependiendo del sistema de recepción se pueden enviar paquetes de hasta 255 bytes con una latencia que depende de la cantidad de módulos conectados y de las distancias de cada uno.

3.4.5.2 Sigfox

SigFox es una red que cuenta con las mismas características de la red LoRa en cuento a la distancia de hasta 15 kilómetros y ultra bajo consumo. Utiliza las mismas bandas del espectro radio eléctrico de 915 MHz y 868 MHz. La diferencia radica en que SigFox es privado por lo que la implementación de sistemas con esta tecnología está limitada por la cobertura que entrega la empresa y los dispositivos disponibles.

SigFox permite la transmisión de hasta 140 paquetes por día y cada paquete puede tener una longitud máxima de 12 bytes lo que limita considerablemente las aplicaciones, sin embargo, estas limitaciones permiten una mayor duración de la batería.

3.4.5.3 Radio Enlace

Los radio enlaces son tecnologías que aprovechan los patrones de radiación de las antenas para transmitir toda la potencia a un área pequeña, esto permite un aumento grande en la distancia que puede alcanzar, dependiendo del sistema que se utilice y la banda de frecuencia disponible, puede llegar a más de 30 kilómetros, y al disponer de las tecnologías Wifi (véase 3.4.4.7) puede llegar a más de 1300 Mbps haciendo que este sea ideal para aplicaciones de alta capacidad de transferencia de datos. Los enlaces comerciales normalmente trabajan como un punto de acceso wifi permitiendo conectar cualquier dispositivo que se encuentre en el rango de cobertura sin embargo estos nos son las únicas alternativas.

Cuando se requiere una capacidad mayor o enlaces de mayor distancia se puede solicitar bandas diferentes a las de uso libre como es la banda de 2.4 GHz, se puede solicitar a través de la Agencia Nacional del Espectro (ANE) una banda de frecuencia exclusiva que permite evitar la interferencia de otras tecnologías sin embargo tiene un costo adicional y se requieren estudios para determinar la disponibilidad de bandas en la zona que se requiere.

Los enlaces que se basan en frecuencias libres como la banda de 915 MHz tienen ventajas respecto a las de mayor frecuencia respecto a la distancia, a medida que la frecuencia disminuye el alcance aumenta, pero es necesario considerar que a menor frecuencia la antena se vuelve más grande.

Las tecnologías de radio enlace suelen trabajar en las capas 1 a 3 del modelo OSI, funcionando como equipos conectados a la red con una dirección IP por lo que su gestión se hace directamente desde algún equipo conectado a la misma red.

Las principales desventajas que tiene la tecnología de radio enlace es la necesidad de tener una línea de vista lo que obliga en muchos casos a tener una torre o mástil donde se pueda montar la antena y el alto consumo energético que requiere para mantener el canal activo.

EN PROCESO DE ADOPCION

3.4.5.4 NB-IoT

La tecnología Narrow Band IoT (NB-IoT) nace como una alternativa más a LoRaWAN y a SigFox para comunicaciones de largo alcance, baja latencia y bajo consumo. Permite conexiones de hasta 15 kilómetros en espacios abiertos y hasta 2 kilómetros en espacios cerrados y está diseñada para mantener una gran cantidad de dispositivos que requiere una baja latencia para transmitir datos. Esta tecnología se basa en el uso de bandas celulares ya sea GSM o LTE, lo que le permite evitar interferencias con tecnologías que se encuentran en bandas de uso libre y permite aprovechar el espectro completo de comunicaciones en las bandas licenciadas. Debido a que ésta tecnología utiliza la arquitectura LTE debe coexistir con las tecnologías sin introducir modificaciones a la estructura y arquitectura de la red celular, implicando una complejidad mayor en comparación con LoRaWAN y SigFox. La tecnología permite transferencia de datos hasta 200 kbps para un canal de 180 KHz y hasta 1 Mbps para un canal de 1.4 MHz.

Entre las ventajas que tiene NB-IoT están:

- Al estar basada en LTE garantiza la entrega de los datos haciéndolo más fiable en comparación con otras tecnologías como LoRaWAN y SigFox.
- El uso de bandas licenciadas asegura una mayor dilatancia y menor interferencia en el uso del espectro radioeléctrico.

Las desventajas con esta tecnología son:

- Aunque se considera como ventaja para interferencia el uso del espectro licenciado, este mismo está limitado al modelo de servicios del operador, a las tarifas, la cobertura disponible.
- El módulo requiere una mayor potencia de transmisión a medida que aumenta la distancia con la torre, implicando un mayor consumo de energía

3.4.5.5 3G / 4G

Las tecnologías móviles presentan características de gran utilidad para el desarrollo de proyectos de monitoreo y control en prácticamente cualquier área, permitiendo conectar múltiples dispositivos a una única red.

La cobertura de estas tecnologías esta dado por la infraestructura del proveedor tanto para 3G como 4G, sin embargo, se puede extender la cobertura si se utilizan dispositivos especializados que utilizan antenas de gran alcance para conexiones de varios kilómetros a torres de comunicación 3G / 4G.

Las características de 3G indican una tasa máxima de velocidad de 7.2 Mbps aunque depende de la cobertura, la saturación de canales y el número de usuarios conectados a la misma antena. En 4G se logran velocidades de hasta 12.5 Mbps para enlaces en movimiento y hasta 1000 Mbps para enlaces estáticos.

3.4.5.6 Satelital

Las tecnologías asociadas a los enlaces satelitales funcionan como las comunicaciones terrestres las cuales emplean ondas electromagnéticas en forma de ases dirigidos. Existen tres tipos de enlaces satelitales.

EN PROCESO DE ADOPCIÓN

- Enlace ascendente desde la estación en tierra hasta el satélite
- Enlace descendente desde el satélite hasta la estación base
- Enlace entre satélites

Los enlaces de ascendente y descendente se basan en señales electromagnéticas, mientras que los enlaces entre satélites pueden ser ópticos o electromagnéticos.

La cobertura con esta tecnología es global, permitiendo la conexión a internet virtualmente en cualquier parte del mundo, sin embargo, la cobertura está limitada por el operador de servicio ya que depende de la cantidad de satélites y la ubicación para asegurar la cobertura global. Las capacidades de un enlace satelital llegan hasta 20 Mbps dependiendo de las condiciones ambientales y del proveedor del servicio puede disminuir hasta 512 kbps.

3.4.6 Comunicaciones con la Nube

Como se ve en los capítulos anteriores, las comunicaciones pueden llegar incluso a cubrir el mundo entero, las comunicaciones con la nube hacen referencia al acceso que tienen las tecnologías para ingresar a la red global de datos sin importar la ubicación.

Muchas de las tecnologías mencionadas anteriormente están definidas para las comunicaciones de corto, media y largo alcance, pero siempre deben llegar a un punto donde se recauda la información, para esto se utiliza la red global de datos o internet que en todos los casos utiliza el Protocolo TCP/IP, En esta sección se analizan las posibilidades que tienen algunas tecnologías para acceder a internet.

La red global permite interconectar dispositivos en cualquier parte del mundo, cualquier equipo que tenga acceso a internet puede comunicarse con otros equipos conectados a la red por tanto la comunicación entre un equipo de recolección de datos ubicado en un puente y disponga de acceso a internet puede enviar o recibir información de otro equipo o servidor en una ubicación a muchos kilómetros de distancia, permitiendo el monitoreo y la gestión de forma remota y en tiempo real.

3.4.6.1 Internet Móvil

Las tecnologías 3G / 4G / 5G permiten conectar equipos a estaciones de radio dentro del alcance de la señal, una vez que ingresan a la red, internamente tienen salida a internet a través de la vasta red que disponen las empresas proveedores de servicios.

Aunque la tecnología 3G / 4G / 5G tiene un máximo canal de datos disponible, esta velocidad se ve reducida por el operador móvil dependiendo del plan de servicio que pueda otorgar y la disponibilidad de servicio según áreas y equipos conectados.

3.4.6.2 Internet Fijo

Los operadores de servicio fijo requieren de infraestructura para entregar acceso a internet, dependiendo del lugar donde se requiera y de disponibilidad de servicio, los operadores pueden tender fibra óptica, cableado de cobre o radio enlace para entregar el servicio de acceso a internet. Las condiciones de operación, disponibilidad de la red, velocidad de acceso tanto de subida como de bajada dependen del servicio contratado y de la disponibilidad de la red.

EN PROCESO DE ADOPCION

CAPÍTULO
4

4 PROTOCOLO DE INSTRUMENTACIÓN

En esta sección se presentan las fases propuestas para realizar la planificación del monitoreo por medio de la instrumentación de una infraestructura, su posterior desarrollo e implementación y así finalmente lograr una operación fiable que cumpla con los objetivos con que fue planeada.

Este protocolo tiene como objetivo mostrar los pasos metodológicos a seguir para que se cumplan los requerimientos perseguidos y entregar la información requerida al equipo que la use para que pueda cumplir con las expectativas deseadas de la instrumentación.

En este proceso intervienen muchos especialistas en las temáticas involucradas desde la planeación de la instrumentación hasta el personal encargado de la toma de decisiones o de usar esta información para cumplir unos objetivos claros y medibles.

Como veremos, el proceso se inicia cuando se determina que es necesario tener información sobre una estructura y su entorno para observar una condición o dar un diagnóstico más detallado con un objetivo determinado. Aquí se definen las variables a monitorear, su ubicación y sus intervalos de medición. También se define cual es la información y como debe ser entregada al especialista que solicitó la instrumentación para que sea interpretada correctamente y sean tomadas las acciones necesarias.

Con los requerimientos de medición y de entrega de información, dados por los expertos en la administración de la infraestructura, los especialistas en instrumentación deben diseñar e implementar un sistema que funcione bajo las condiciones especificadas por el protocolo de medición.

Los factores que se tendrán en cuenta para el diseño de la instrumentación son:

- Objetivo básico del monitoreo y protocolos de medición: estructura a monitorear, (ubicación geográfica), duración del monitoreo y forma de entrega de los datos.
- Variables físicas a monitorear, ubicación y rangos de medida.
- Conectividad requerida entre sensores, transductores.
- Sistema de digitalización y almacenamiento local de información.
- Transmisión de datos, comunicaciones.
- Sistema de manejo de información, proceso, almacenamiento y presentación de datos.

EN PROCESO DE ADOPCION

Este plan de monitoreo puede ser muy variado ya que depende de muchas condiciones particulares de la estructura y de los requerimientos de la información obtenida y debe contener la información necesaria para que sea posible definir en detalle todos los aspectos de la instrumentación, desde tipo de variables a medir, hasta los formatos, presentación y procesamiento de datos para cumplir con los objetivos propuestos. Lo anterior implica la interacción de varios grupos de trabajo en diferentes áreas de conocimiento en la ingeniería.

Este protocolo no pretende definir una secuencia rígida de desarrollo de un proceso de monitoreo o de pretender establecer una forma de realizar la instrumentación a todos los niveles. Se trata de mostrar unos factores o pasos relevantes a tener en cuenta para tener un sistema de monitoreo que sea funcional a lo largo del tiempo que sea requerido para cumplir los objetivos para el cual fue concebido.

4.1 Fase 1: Definición del plan de monitoreo.

En la Figura 4-1 se presentan las etapas generales para el plan de monitoreo. El especialista en estructuras debe entregar a los encargados del diseño de la instrumentación la información suficiente para que pueda definir en detalle cada uno los elementos físicos (hardware) y de proceso de información (software) que se requieren para cumplir con los requerimientos del plan de monitoreo.

Este plan de monitoreo debe tener un objetivo claro y **lo deben generar los especialistas en la gestión de la infraestructura** y debe tener en cuenta que el objetivo de la instrumentación es el punto más importante, ya que una definición ambigua o incompleta de este punto puede conducir a un sistema que no cumpla con lo requerido, en este punto debe tenerse en cuenta las personas responsables de la infraestructura que estarán administrando el sistema en cada uno de los puntos requeridos en la operación o que usando la información final obtenida para cumplir los objetivos propuestos. Lo anterior significa que se debe tener claro los objetivos del sistema y el personal involucrado y comprometido con su funcionamiento.

Algunos puntos que deben especificarse para iniciar la definición o el diseño del sistema son:

- Estructura o estructuras a monitorear.
- Planos de las estructuras.
- Las magnitudes físicas que deben adquirirse (mesurandos), su ubicación exacta en la estructura y si es necesario, su dirección en el espacio con respecto a un sistema de coordenadas.
- Características de ancho de banda y de intervalos de medición de cada variable.
- Protocolo para la toma de datos: duración, condiciones de activación, interacción con operarios, etc.
- Los algoritmos con los que deben procesarse los mesurandos.
- Formas de visualización, archivo y consulta de datos del resultado de la actividad de monitoreo solicitada. Este punto puede ser diferente según sea los requerimientos de la instrumentación, si se trata de una prueba “rápida” tipo prueba de carga es posible que solo se requieran datos “tiempo real” en el lugar de la prueba o si se trata de un plan de monitoreo

EN PROCESO DE ADOPCION

a nivel regional se deben indicar los protocolos de entrega de datos a INVIAS para garantizar que sean compatibles con el sistema de gestión sin importar el proveedor.

- En caso de ser prioritario, un presupuesto disponible para el desarrollo de este plan de monitoreo.

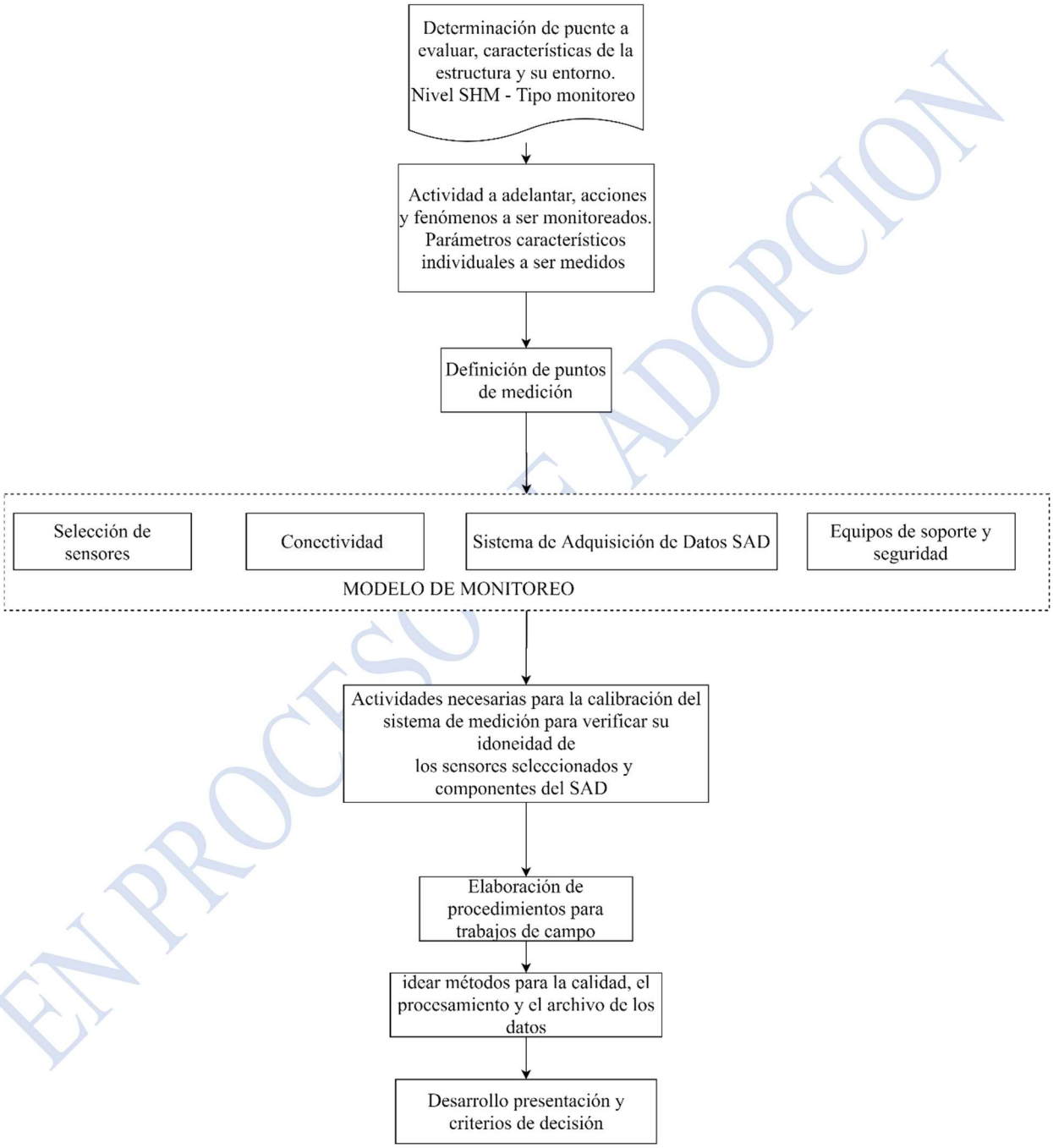


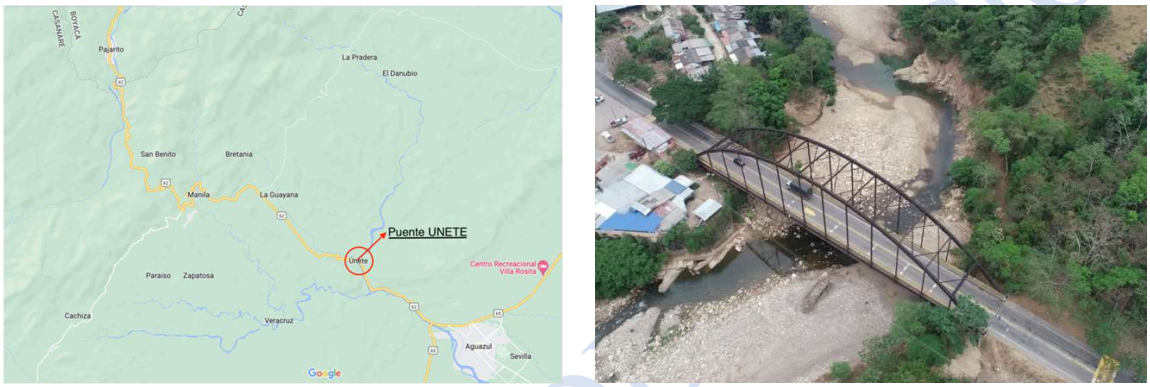
Figura 4-1 Flujograma del proceso de monitoreo.

EN PROCESO DE ADOPCION

4.1.1 Ejemplo Fase:1 Definición del plan de monitoreo

En el presente apartado se presenta un ejemplo de aplicación de la Fase 1 del protocolo, en donde se tiene que para el puente UNETE:

- ***Objetivo de la instrumentación:*** monitoreo del puente para detectar sobrecargas que puedan llegar a comprometer la integridad estructural y generar alarmas tempranas para que se tomen las medidas que sean del caso antes de tener daños más grandes.
- ***Estructura a monitorear:*** puente metálico con arco superior (puente UNETE) ubicado en el corredor vial Pajarito (Boyacá) – Aguazul (Casanare). En la Figura 4-2 (a) se observa la ubicación geográfica del puente y en la Figura 4-2 (b) una imagen general del puente.



(a) (b)

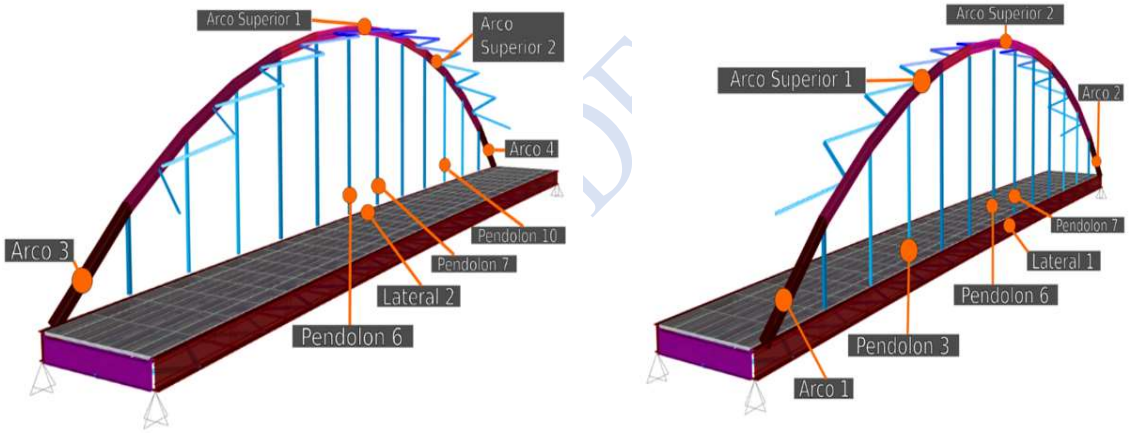
Figura 4-2 (a) Ubicación geográfica puente a monitorear (b) Puente a monitorear

- ***Definición de características e intervalos de medición de las variables a medir:*** en la Tabla 4-1 se observan la variable a medir, el rango o amplitud de medidas esperadas, la tasa de adquisición de datos o intervalo de medición, alarmas de un incorrecto funcionamiento del sensor y observaciones generales de ubicación y montaje del sensor. En la Figura 4-3 se muestra la ubicación de los sensores en un isométrico del puente.
- ***Protocolo para la toma de datos:*** la tasa de muestreo será un dato por segundo para las medidas de strain y de 1 dato por minuto para las medidas de temperatura. La duración del monitoreo será de 5 meses. Los datos se tomarán de forma desatendida, por lo cual no se requiere personal en campo para la toma de la información. Dadas las características de ubicación del puente es necesaria la vigilancia de los equipos de adquisición de datos, cableado y sensores las 24 horas del día los 7 días de la semana.
- ***Procesamiento de las variables a medir:***
    - A partir de las mediciones de deformación unitaria (strain) se obtendrán los esfuerzos que actúan en cada elemento monitoreado.
    - Se aplicarán análisis estadísticos para obtener un factor de confiabilidad en cada elemento.
    - Se determinarán límites para generar las alarmas tempranas en cada elemento instrumentado.

EN PROCESO DE PUBLICACIÓN

Tabla 4-1. Características de las variables a medir.

Cantidad	Variable	Amplitud	Alarmas	Frecuencias	Observaciones
4	Strain (με)	0-500	1700	1 Hz	Lineal en eje principal del elemento estructural. Pendolón.
4	Strain (με)	0-500	1700	1 Hz	Lineal en eje principal del elemento estructural. Cara interna del inicio de los arcos.
4	Strain (με)	0-500	1700	1 Hz	Lineal en eje principal del elemento estructural. Elementos superiores del arco.
2	Strain (με)	0-500	1700	1 Hz	Lineal en eje principal del elemento estructural. Centro de vigas inferiores.
4	Temperatura (ºc)	-10 a 100	90	1 /min.	Montado sobre la superficie metálica lo más cercano al sensor de strain.



(a) (b)

Figura 4-3 Ubicación de sensores en el puente (a) Sensores arco aguas arriba (b) Sensores arco aguas abajo

- ***Flujo de datos, almacenamiento y visualización de la información:***

Cada uno de los sensores es responsable de medir una variable o un grupo de variables sobre uno de los elementos que conforman el puente, y estos datos tendrán un pre y post proceso para finalmente ser analizados por expertos. El flujo de datos consiste en:

- El sensor calibrado envía al equipo de adquisición un dato electrónico enmarcado dentro de un tipo, un rango y una frecuencia, cuya variación determina el estado de la variable medida.

- El equipo de adquisición recibe la señal del sensor y es responsable de armar los paquetes de datos en estado “bruto”.
- Los datos en bruto deben ser pre procesados dentro del mismo colector o en otro equipo en sitio, obteniendo paquetes optimizados de datos electrónicos “alisados”, que registran las variaciones importantes y donde se eliminan datos intermedios no relevantes o no usables.
- Los datos deben ser almacenados y transmitidos. El proveedor debe suministrar el sistema de almacenamiento, así como su sistema de transmisión de datos. Los paquetes alisados deben armarse dentro de un protocolo predefinido por el INVIAS para cada esquema de instrumentación, que especifica el etiquetado, el formato, el tamaño de estos paquetes y su respectivo metadato. Esta entrega debe ser en tiempo real, salvo que por fuerza mayor las condiciones de ubicación y cobertura de Internet del puente no lo permitan.
- Los paquetes alisados son recibidos por uno de los servidores intermedios que forman parte de la infraestructura en la nube del INVIAS. El objetivo de estos servidores es recibir la información optimizada en unidades “electrónicas”, almacenarla y post procesarla para convertirla a unidades “civiles” (desplazamientos, deformaciones, esfuerzos, temperaturas, presiones, caudales, velocidades etc.). Este es el segundo estado de la información, que debe ser almacenada en estos servidores, durante un tiempo definido por el sistema de aseguramiento de calidad del INVIAS y el tiempo de vigencia de los registros de calidad.

4.2 Fase 2: Diseño del sistema de instrumentación

Tomando como base la información generada en la Fase 1, el equipo encargado de la instrumentación deberá diseñar el sistema y definir cada uno de los elementos que lo constituyen para así entregar la información de diseño. Esta debe contener al menos:

- Documentos detallados de montaje de sensores y sus números de parte.
- Diseño de cableado, planos arquitectónicos y eléctricos.
- Conectividad entre equipos de adquisición y comunicaciones. Planos de montaje. Referencias específicas de equipos.
- Equipos de soporte de energía. Planos físicos, eléctricos y números de parte.
- Manejo propuesto de información y alarmas. Almacenamiento, proceso de información, software utilizado, interfaces de usuario, requerimientos de servidores, etc.
- Presupuesto y cronograma de actividades.
- Protocolo de operación y soporte del sistema.

Es claro que se pueden llegar a múltiples soluciones de una instrumentación a partir del mismo plan de monitoreo, los criterios de selección de cada uno de los elementos pueden ser diferentes según quien realice este diseño, por ejemplo, hay diseñadores asociados a marcas específicas de equipos y sensores que pueden tener criterios de implementación diferentes, pero que en cualquier caso se deben tener en cuenta algunos factores adicionales al plan de monitoreo que condicionan y definen las especificaciones generales de la instrumentación:

EN PROCESO DE ADOPCIÓN

- Tipología y dimensiones del puente.
    - Metálico arco.
    - Colgante.
    - Atirantado.
    - Etc.
- Ubicación geográfica.
    - Condiciones geográficas del entorno inmediato del puente.
    - Disponibilidad de energía.
    - Disponibilidad de redes de datos.
    - Condiciones ambientales.
- Duración y protocolos de la medición.
    - Instalación permanente.
        - Monitoreo de operación de un puente.
    - Pruebas de corto plazo.
        - Prueba de carga.
        - Pruebas específicas de diagnóstico.
        - Paso de cargas especiales.
    - Pruebas de mediano plazo.
        - Análisis estructural.
        - Monitoreo de alarmas de corto plazo.
        - Estudios de evolución de la estructura.
- Lugar de entrega de la información y respaldo de datos.
    - Local (generalmente en pruebas atendidas de corto plazo).
    - Local y generación de alarmas remotas.
    - Disponibilidad de datos en la nube. Servicios web.

4.2.1 Ejemplo Fase 2: Esquema general de medición y planos de conexión a puntos de medición

En el corredor vial Yopal – Paz de Ariporo se implementó un sistema de monitoreo en el puente Tocaría para medir los posibles efectos de socavación que podrían estar sufriendo las pilas. En la Figura 4-4 se muestra un esquema general de la instrumentación de una de las pilas del puente donde se midieron la profundidad o nivel de sedimentos en la pila y nivel y velocidad de la lámina de agua.

EN PROCESO DE ADOPCION

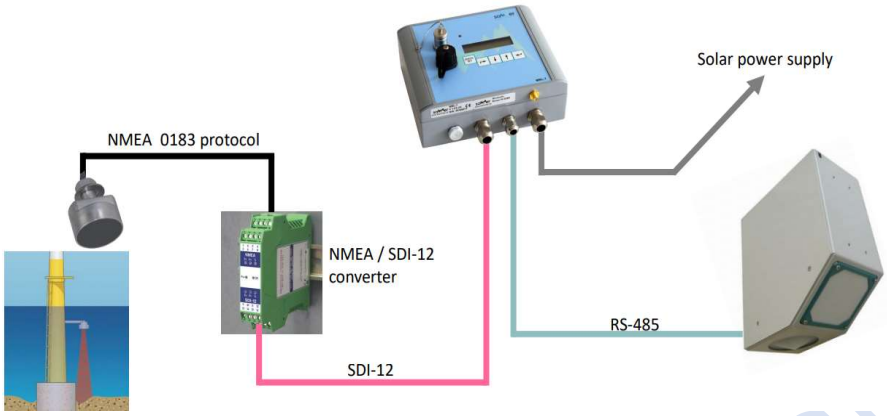


Figura 4-4 Esquema general de medición de socavación para pila del puente Tocaría.

La Figura 4-5 muestra el plano de conexión a punto de medición de una de las pilas del puente donde se midieron la profundidad o nivel de sedimentos en la pila y nivel y velocidad de la lámina de agua.

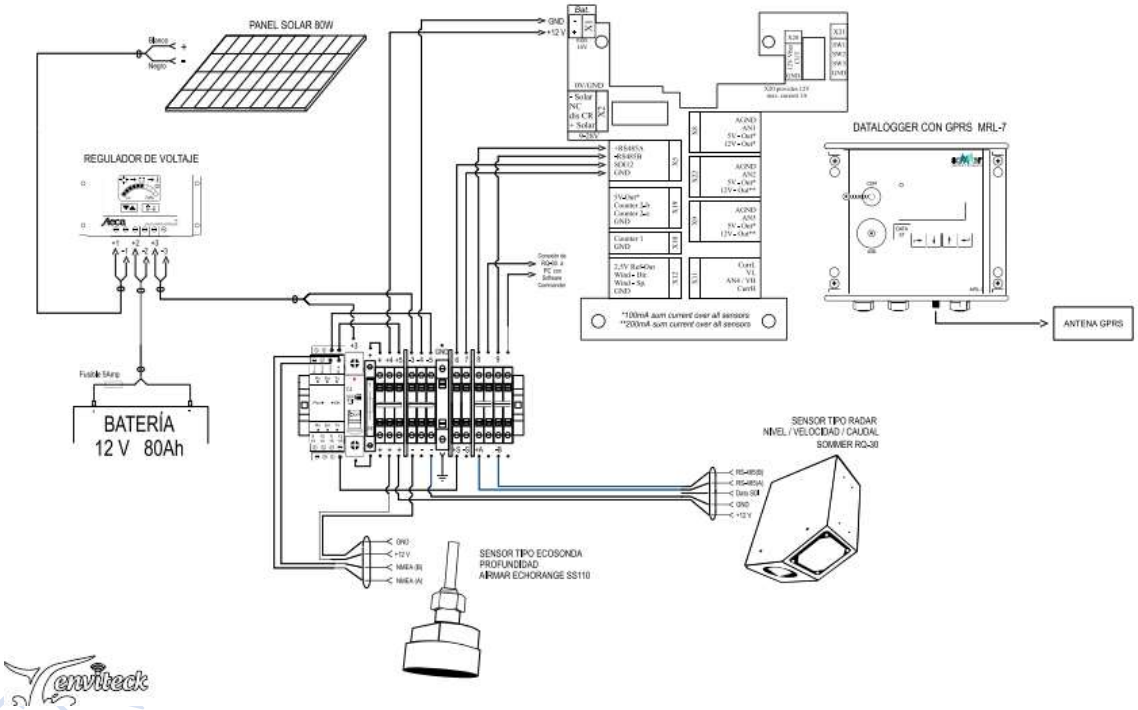


Figura 4-5 Plano de conexión a punto de medición para pila del puente Tocaría.

4.3 Fase 3: Montaje e implementación

En este numeral se muestran los diferentes pasos a ejecutar para llegar al montaje final en el puente y la puesta a punto para iniciar la fase operativa.

4.3.1 Consideraciones sobre el sitio de instalación.

Las condiciones del sitio del puente como son su entorno geográfico, ambiental, social y la variable tránsito son aspectos muy relevantes para la definición tanto de los sistemas de monitoreo como de su método de instalación en las estructuras evaluadas. Se deben considerar entre otros los siguientes aspectos en el desarrollo de la fase de planeación de los trabajos:

- Ubicación la cual define aspectos como accesibilidad, facilidades operativas, de comunicación y seguridad para personal y equipos instalados (sistemas instalados para monitoreo de mediano y largo plazo pueden requerir protecciones adicionales incluyendo personal de vigilancia ya que pueden ser objeto de hurto y vandalismo).
- Requerimientos de equipos para acceso que consisten en medios auxiliares tales como andamios, grúas, elevadores, botes, plataformas colgantes, etc. (véase Figura 4-6). La complejidad en la consecución e instalación de estos elementos puede definir el uso de sensores alternativos, comunicación inalámbrica o adelantar pruebas sin contacto.
- Controles de tráfico (requerimiento de plan de manejo de tránsito), aspectos como la intensidad del tráfico, el alineamiento del puente y la velocidad vehicular condicionan los trabajos sobre el puente. La observancia rigurosa de los requerimientos de señalización y manejo de tráfico son fundamentales para garantizar la seguridad del personal en campo.
- Se debe adelantar previo a los trabajos de instrumentación trabajos de mantenimiento menor y limpieza del puente para las actividades de montaje.

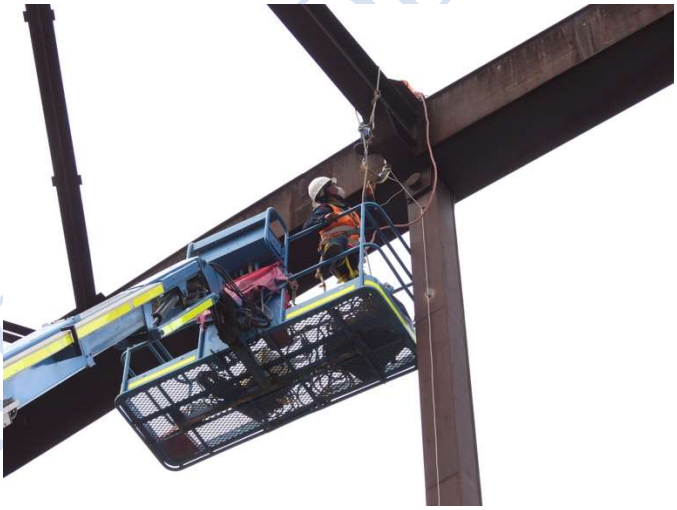


Figura 4-6 Uso de medios auxiliares para la instalación de sensores.

Se deben seguir en todo momento las normativas de seguridad y salud en el trabajo y de manejo ambiental vigentes en el país o establecidas por los diferentes entes territoriales.

4.3.2 Software de adquisición y despliegue

Una vez instalados todos los elementos de hardware necesarios en campo, se debe contar con el software que permita realizar las pruebas de funcionamiento básicas para garantizar que el sistema cumple con las especificaciones técnicas para el cual fue diseñado. En este proceso de

EN PRO DE ADOPCION

implementación se parte de la adquisición de todos los elementos de hardware y software necesarios para la implementación por parte del recurso humano capacitado para realizar esta labor, además de contar con todos los aspectos logísticos del trabajo en campo con todos sus planes de acción y seguridad.

Este punto se puede entender como los recursos de software requeridos para dar mantenimiento a los equipos de adquisición y entregar la información en el lugar y en la forma solicitada para cumplir con el objetivo.

Una vez se tiene funcional este sistema se puede verificar cada uno de los elementos de forma individual y en su funcionamiento en conjunto. Se debe verificar el funcionamiento de cada uno de los sensores instalados hasta el despliegue de la información que va desde los puntos de medición hasta el usuario final, esto incluye toda la cadena software-hardware requerida para adquisición, transmisión, almacenamiento, proceso y visualización de la información.

4.3.3 Puesta a punto. Pruebas de validación.

Después de tener funcional el sistema de adquisición es indispensable verificar que las mediciones de las variables solicitadas se están adquiriendo según lo especificado y que el manejo y despliegue de información es adecuado a lo requerido.

En esta fase se debe determinar si todas las instalaciones en campo son funcionales y están entregando la información adecuada. A diferencia de instalaciones y pruebas en laboratorio, en buena parte de los casos no es posible o es muy difícil ajustar o reinstalar sensores, por ejemplo, sensores embebidos o soldados sobre la estructura, medición sobre torones, celdas de carga, etc.

Por lo anterior se recomienda establecer protocolos de prueba para evaluar si se obtiene información consistente, por ejemplo, si se tienen sensores de tensión de cables en un puente, se puede verificar si están dentro se los rangos establecidos y se puede realizar una prueba como el paso de una carga de conocida para verificar si se obtienen las mediciones esperadas, aquí se hace evidente que las especificaciones iniciales de los valores esperados son un buen punto de referencia para determinar si está o no operativo un punto de medición. Se puede decir que esta fase finaliza cuando se ha verificado la consistencia de los datos con el comportamiento esperado.

4.3.4 Ejemplo Fase 3: Montaje e implementación

Como ejemplo de la puesta a punto y de las pruebas de validación en la instrumentación adelantada en el puente UNETE, después de ser instalados los sensores y verificar que el software de adquisición este funcional se comprobó que los datos entregados correspondieran a los esperados en la fase de planeación. La Figura 4-7 muestra los datos obtenidos durante el proceso de validación y de los cuales se puede concluir que:

- La influencia de la temperatura en la tendencia de todas las gráficas, la correlación es clara, se esperaba este efecto.
- Sobre las líneas base de cada señal se observan “picos” que son causados por el tráfico que pasa por el puente y que muestran que todas las gráficas de deformación unitaria están

EN PROCESO DE ADOPCIÓN

correlacionadas con el efecto de la carga de los camiones pesados, los vehículos pequeños producen variaciones muy pequeñas.

- La dirección de los "picos" de carga corresponde a los esperado:
    - Pendolones: tracción.
    - Base de arcos: compresión.
    - Arco superior: compresión.
    - Vigas inferiores: tracción – compresión.

- La temperatura es mayor en la parte superior del arco que en la base de los pendolones por varias decenas de grados Celsius.

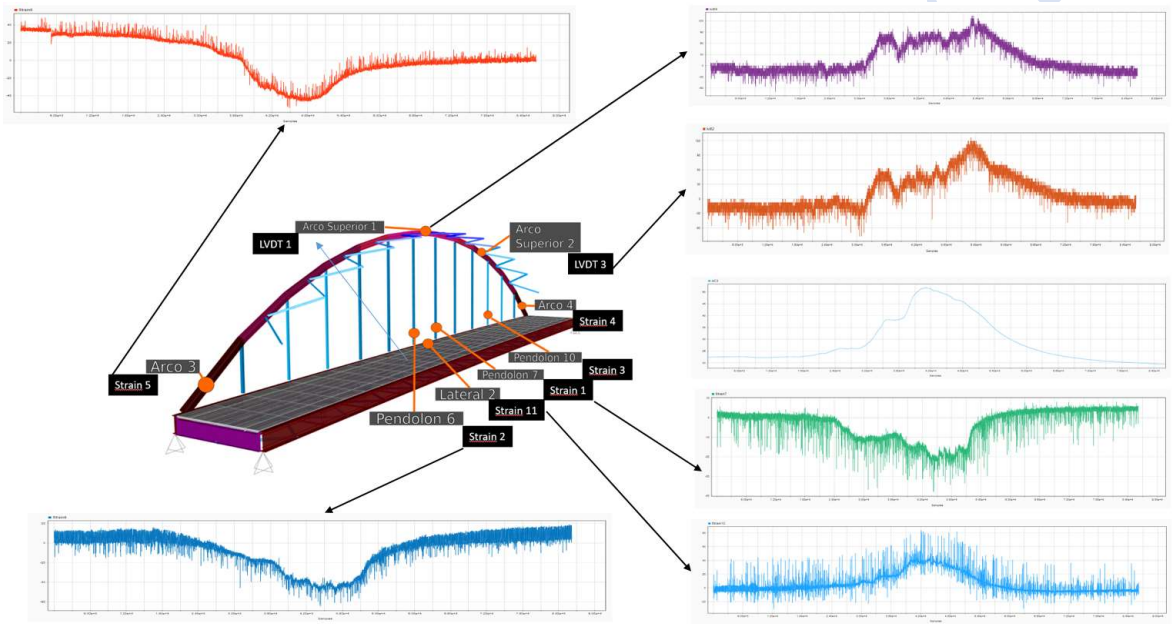


Figura 4-7 Señales tomadas para verificar consistencia de los datos.

Con la información anterior se puede concluir que las mediciones presentan un comportamiento cualitativamente consistente con lo esperado.

También se realizaron pruebas cualitativas en las cuales se verificaron las magnitudes obtenidas y se compararon con un modelo del puente.

En la Figura 4-8 se muestra la señal en uno de los sensores de un pendolón para verificar la consistencia de los datos. Los "picos" representan las cargas causadas por el paso de vehículos. El valor pico mostrado en la gráfica tiene un valor de -414 με, aquí podemos afirmar que la deformación unitaria producida por un camión a las 02:42:47 del día junio 7 de 2021 fue de -24 με, (el signo negativo corresponde a tracción).

Para verificar si las deformaciones unitarias medidas corresponden a un valor relacionado con el modelo se asumió una hipótesis de carga con un camión de fatiga de AASHTO de 320 kN de tres ejes

y los valores obtenidos corresponden de forma cercana a los predichos por el modelo. En la Figura 4-9 se muestra el modelo de la hipótesis de carga para verificar deformaciones unitarias en el pendolón, donde se evidencia que las medidas están dentro los valores esperados.

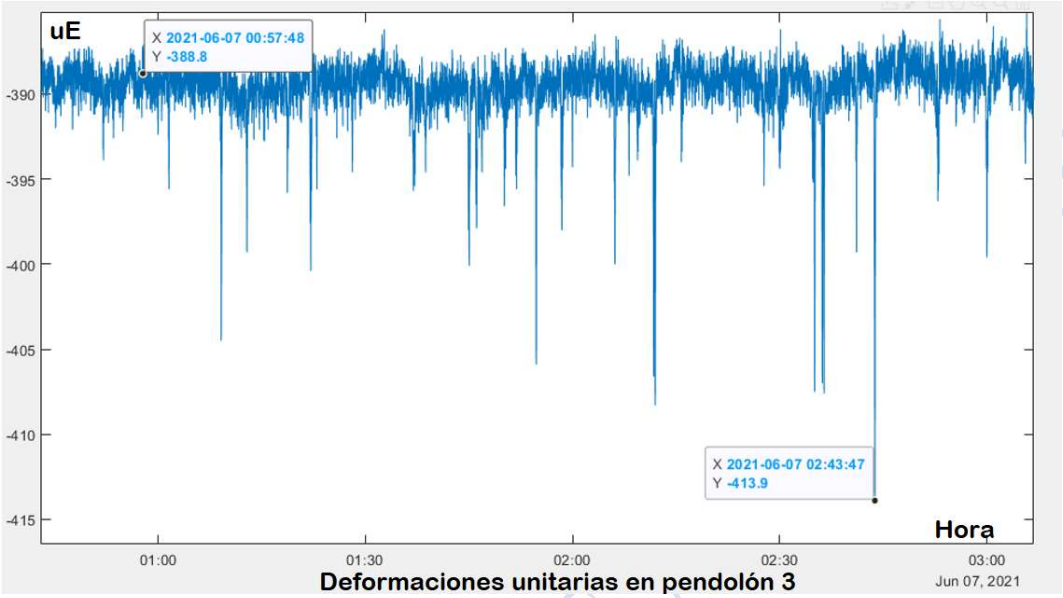


Figura 4-8 Señales tomadas de un elemento para verificar la consistencia de los datos.

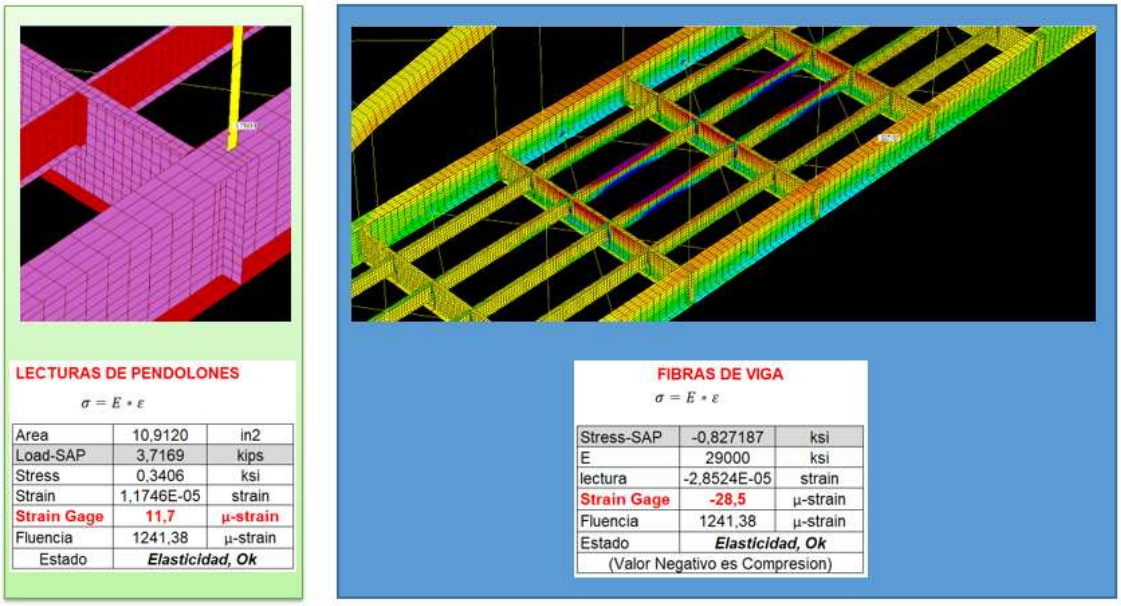


Figura 4-9. Hipótesis de carga para verificar deformaciones unitarias en el pendolón 3.

4.4 Fase 4: Operación bajo protocolos establecidos

En esta fase deben tenerse en cuenta las medidas que sean necesarias para que el sistema opere adecuadamente durante el tiempo que se haya planeado. Garantizar el funcionamiento para planes de

monitoreo a largo plazo es quizá uno de los factores que más exige planeación y asignación de recursos humanos y económicos que garanticen que el objetivo se cumpla a lo largo del tiempo.

Algunos factores a tener en cuenta en este caso son:

- Recursos necesarios para garantizar la integridad de todo el sistema durante el tiempo de monitoreo, esto contemplara el personal y recursos para garantizar:
    - Seguridad de los equipos instalados en campo.
    - Sistemas de respaldo de energía.
    - Mantenimiento de los equipos y atención de eventos ocasionales.
    - Conectividad que permita mantener los canales de comunicación requeridos.
    - Soporte de seguridad y administración del software y los datos obtenidos.
    - Actualización constante de la forma de entregar los datos al personal encargado, esto es importante en caso de instrumentaciones a largo plazo.

4.4.1 Ejemplo Fase 4: Operación bajo protocolos establecidos

El equipo puede operar en modo atendido, hay una persona a cargo de la toma de datos en un computador, sin dejar de mencionar que los datos siempre se almacenan en una memoria SD interna el equipo. También puede operar en modo desatendido en el cual se deja el equipo funcionando con alimentación de una batería que permite trabajar hasta 15 días seguidos de captura de datos.

Se presenta a nivel de ejemplo la implementación de la fase 4 en la instrumentación del puente Unete mencionado en ejemplos anteriores.

Personal encargado en campo:

- Dos turnos de vigilancia durante las 24 horas del día para evitar posibles robos o vandalismo.
- Un técnico de la región que puede atender fallos menores en la instalación.

Personal pendiente de la consistencia de los datos en los servidores.

- Un ingeniero electrónico realizando inspecciones periódicas sobre la calidad de los datos obtenidos de cada uno de los sensores para tomar acciones correctivas en caso de algún problema.
- Un ingeniero de sistemas verificando la integridad de los datos y los canales software-hardware para garantizar que se entregue la información correcta al grupo de toma de decisiones.

Personal de toma de decisiones en alerta temprana.

- Dos ingenieros estructurales encargados de analizar la información y de comunicar al personal pertinente cualquier anomalía registrada.

Eventos destacados detectados durante la operación:

Durante la operación se detectaron algunos eventos que fueron atendidos para garantizar el funcionamiento continuo.

- Al menos cuatro intentos de robo de los equipos, cableado y/o sensores. Esto causo el daño en el cableado de algunos sensores, por lo cual hay dos RTDs y strain-gauges quedaron por fuera de servicio. Una reparación de este daño no es viable ya que implica un trabajo de desmontar buena parte del cableado para encontrar el punto de falla. Se detectó que el problema está en el cableado, ya que después de los daños producidos en un intento de robo se cambiaron los sensores y el funcionamiento fue reestablecido.

EN PROCESO DE ADOPCIÓN

- Tormenta eléctrica que causó daños a la red eléctrica, quedo por fuera de servicio por daño en la red de alimentación. Las acometidas eléctricas que sufrieron daño fueron reparadas y se retomó el funcionamiento.
- Otro factor que afecto el funcionamiento, pero no deja el sistema fuera de operación, son cambios abruptos en la señal de algunos sensores, esto es causado por la presencia de aves cerca de los puntos por donde está el cableado, como se mencionó anteriormente, no está instalado en ductos lo cual los deja expuestos en las zonas por debajo del puente donde no fue posible realizar trabajo de alturas para dejarlos más protegidos, estos saltos abruptos son corregidos en el post-proceso de la información.
- Finalmente, para minimizar los posibles eventos de vandalismo, robo y posibles afectaciones por las aves que están en el puente se reforzaron algunas protecciones del cableado y los equipos.

4.5 Fase 5: Procesamiento de información, reportes sobre la infraestructura y acciones a tomar

Este el resultado final de todo el plan de monitoreo, cumplir con los objetivos propuestos y así administrar de forma eficiente y segura la infraestructura usando la información confiable suministrada por el sistema de monitoreo.

Para lograr lo anterior el grupo que se encarga de la gestión tiene que analizar la información entregada por el sistema, generar protocolos de atención ante condiciones anormales y tomar acciones que garanticen el objetivo propuesto.

Los datos deben ser analizados por parte de los expertos en el tema, por ejemplo, estableciendo umbrales de alarma y generando recomendaciones después de los meses de toma de datos con su posterior análisis.

En esta fase se pueden generar recomendaciones que afecten el sistema para su mejora y adaptación a lo largo del tiempo, por lo cual es importante considerar flexibilidad en los elementos hardware-software que lo constituyen, y considerar esta opción como parte de la propuesta inicial, y tener, en la medida de lo posible, sistemas abiertos que puedan ser actualizados por los equipos técnicos que sean del caso.

EN PROCESO DE ADOPCION

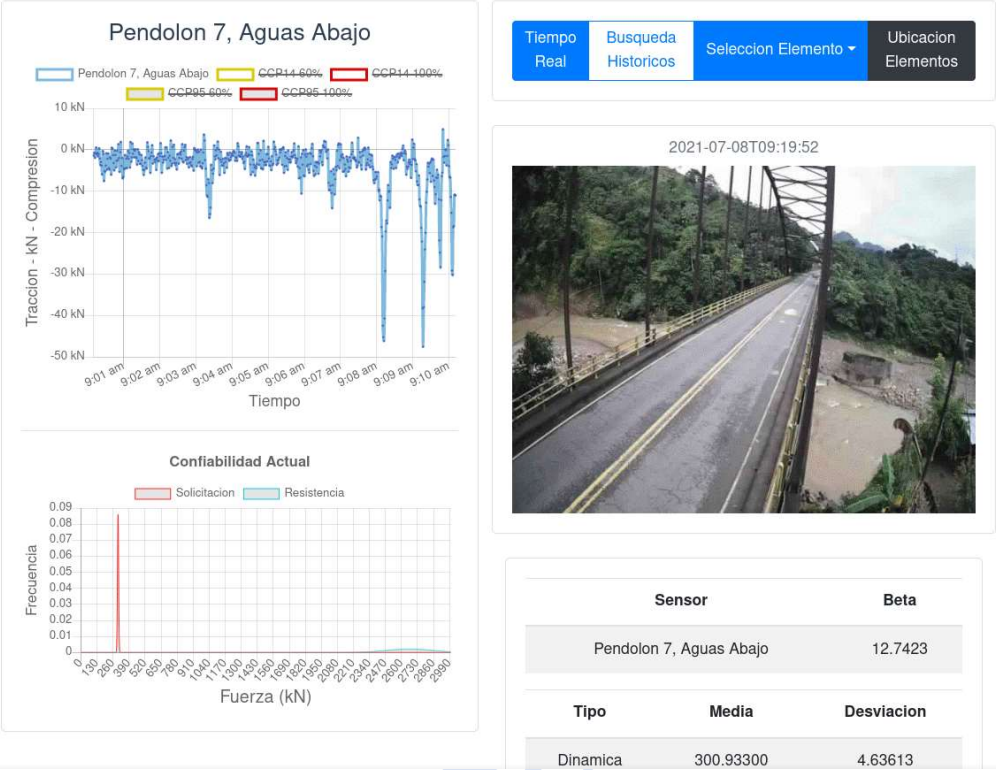


Figura 4-10. Interface gráfica de monitoreo

En la Figura 4-10 se presenta a nivel de ejemplo la implementación de la fase 5 en la instrumentación del puente Unete mencionado en ejemplos anteriores. Se muestra la interface gráfica que permite al personal encargado de tomar acciones revisar toda la información obtenida y atender una posible alerta. En esta interfaz se pueden seleccionar los diferentes elementos instrumentados del puente, contrastar las medidas de los sensores con los umbrales establecidos para cada uno de los elementos, relacionar los valores medidos con el paso de vehículos sobre el puente, estas como funcionalidades básicas de la interfaz, así mismo, se puede seleccionar un rango de tiempo para visualizar, cual sensor se desea visualizar, así como imágenes en tiempo real, del tráfico actual sobre el puente (con demoras estimadas entre 2 y 5 minutos entre el tráfico y la visualización, debido a conectividad limitada, y otros factores técnicos).

EN PROCESO DE

5 REFERENCIAS

Adams, D. E. (2007). *Health Monitoring of Structural Materials and Components Methods with Applications -Purdue University, USA*.

Aktan, A. E., Catbas, F. N., Grimmelsman, K. A., & Pervizpour, M. (2002). *Development of a Model Health Monitoring Guide for Major Bridges Report Submitted to : June*.

Al-Qadi, I., Wang, H., Ouyang, Y., Grimmelsman, K., & Purdy, J. (2016). LTBP program's literature review on weigh-in-motion systems. *United States Department of Transportation, Federal Highway Administration*, *June*. https://ntl.bts.gov/lib/61000/61400/61459/16024.pdf

ANSI/TIA. (2009). *Generic Telecommunications Cabling for Customer Premises* (Issue February).

Arcas, J. P. (2008). *Control de la fuerza de tesado y la remanente con células de carga*.

ASTM E 1318. (2002). Standard Specification for Highway Weigh-In-Motion (WIM) Systems with User Requirements and Test Methods. *ASTM Standard E 1318*, *04*(Reapproved 2017), 1–16. https://doi.org/10.1520/E1318-09.2

BDI. (2020a). *Cable Potentiometer (CPOT)*.

BDI. (2020b). *Micro RDT (RDT-M)*.

BDI. (2020c). *RDT*.

Buchman, S., Mester, J., & Sumner, T. J. (1999). Measurement, Instrumentation And Sensors Handbook. In *CRC PRESS, IEEE PRESS*. https://doi.org/10.1201/9780203009406

Campbell R. Middleton, Paul R. A. Fidler, P. J. V. (2016). *Bridge Monitoring: A practical guide*.

CANADA-ISIS. (2003). *Guidelines for Structural Health Monitoring*.

Chen, Y., Feng, M. Q., & Tan, C.-A. (2009). Bridge Structural Condition Assessment Based on Vibration and Traffic Monitoring. *Journal of Engineering Mechanics*, *135*(8), 747–758. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2009)135:8(747)

DEVELOPMENT, S. (2007). *Monitoring Instrumentation and Techniques Background document D5.1*.

Diamantidis, D., Sykora, M., & Sousa, H. (2019). Quantifying the Value of Structural Health Information for Decision Support: Guide for Practising Engineers. *COST Action TU1402*, *May*, 1–61.

EN PROCESO DE ADOPCION

Eren, H. (2017). Acceleration, vibration, and shock measurement. *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook: Spatial, Mechanical, Thermal, and Radiation Measurement, Second Edition*, 36-1-36–34. https://doi.org/10.1201/b15474

Ferrer, B., Mas, D., García-Santos, J. I., & Luzi, G. (2016). Parametric Study of the Errors Obtained from the Measurement of the Oscillating Movement of a Bridge Using Image Processing. *Journal of Nondestructive Evaluation*, *35*(4), 53. https://doi.org/10.1007/s10921-016-0372-6

FIB-CEP-FIP. (2003). *Monitoring and safety evaluation of existing concrete structures - state of art report report prepared by : Task Group 5.1*.

Groundprobe. (n.d.). *Groundprobe*.

Hbm.com. (2020). *HBM*.

HBM. (2020a). *Galgas extensométricas HBM: ideales para mediciones de deformación*.

HBM. (2020b). *Introducción a las cadenas de medida ópticas con tecnología de fibra con rejilla de Bragg (FBG)*.

HBM. (2020c). *Transductor de desplazamiento DD1: medida de desplazamiento y deformación con clase de precisión 0,1*.

Hitech. (n.d.). *NORIA – the Fiber Bragg Grating manufacturing solution*.

IEEE Computer Society. (2007). Part 11: Wireless Lan Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. *IEEE Std 802.11-2007*, *2007*(June).

Institute, Information Sciences California, U. of S. (1981). *TRANSMISSION CONTROL PROTOCOL*.

Instruments, N. (2019). *Filtros Anti-Aliasing y su Uso Explicado*.

INVIAS/AIS. (2014). *Norma Colombiana de Diseño sismo resistente de puentes*.

INVIAS/PUJ/UNIANDES. (2020a). *Manual de Fatiga*.

INVIAS/PUJ/UNIANDES. (2020b). *Manual de pruebas de carga(Submódulo del módulo 4)*.

INVIAS/PUJ. (2008). *Informe Final Viaducto Pereira-Dosquebradas"Aunar esfuerzos técnicos y financieros para incrementar la seguridad y estabilidad del viaducto Cesar Gaviria Trujillo de la carretera solución vial - Pereira - Dos quebradas (Ruta 29 RSA) y del puente Cajamarca*.

INVIAS/UNIANDES/PUJ. (2020). *Manual de capacidad de carga*.

ISHMII. (2002). *Guideline of SHM*.

Information technology — Open Systems Interconnection — Basic Reference Model: The Basic Model, 59 (1994).

Iwamoto, T., & Kanie, S. (2017). Evaluation of Bending Behavior of Flexible Pipe Using Digital Image Processing. *Procedia Engineering*, *171*, 1272–1278. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.422

Kester, W. (2004). *Analog-digital conversion*.

Marulanda, O., Thomson, P., & A., J. M. (2000). *MONITOREO DE SALUD ESTRUCTURAL*.

EN PROCESO DE ADOPCION

Micro-epsilon. (2020a). *Capacitive sensors for displacement, distance and position*.

Micro-epsilon. (2020b). *Inductive sensors (eddy current) for displacement, distance & position*.

Monitor, C. T. (2010). *Model 3000 Series*. *2718*.

Muñoz, E., Nuñez., F., Rodríguez, J., Ramos, A., & Otalora, C. (2010). Seismic vulnerability and loading capacity of a wire strained bridge based on structural reliability (Pontificia Universidad Javeriana). *Revista Ingeniería de Construcción - Chile*.

Muñoz, E., Nuñez, F., Otalora, C., Rodriguez, J., Avellaneda, G., Galvis, F., Magallón, A., Ramos, A., Gomez, D., Carlo., F., Mauricio, B., Selim, R., & Smith, P. (2012). Ingenieria de puentes - Tomo 3(Premio nacional de ingenieria Diodoro Sanchéz otorgado por la SCI -2012). In *Ingenieria de puentes* (p. 449).

Muñoz, E., Rodríguez, J., Núñez, F., Otálora, C., & Ramos, A. (2008). Vulnerabilidad sísmica y capacidad de carga de un puente en acero basado en confiabilidad estructural. *Revista Ingeniería de Construcción, Vol. 23, No. 3, Pp. 125-144*.

Muñoz Edgar, Nuñez Federico , Rodríguez, Jorge, Ramos, Alfonso, Otalora, C. (2010). Seismic vulnerability and loading capacity of a wire strained bridge based on structural reliability (Pontificia Universidad Javeriana). *Revista Ingeniería de Construcción - Chile*.

Omega. (n.d.-a). *Sonda RTD Pt100 de superficie*.

Omega. (n.d.-b). *Termopar*.

Parra, A. F. Q. V. M. (2010). ESTADO DEL ARTE EN MONITORIZACIÓN DE SALUD ESTRUCTURAL: UN ENFOQUE BASADO EN AGENTES INTELIGENTES. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina, Vol. 20-1, Pp. 117-132.*

Potter, K. D., & Setchell, C. (2014). *Positional Measurement of a Feature Within an Image* (Patent No. US 8,718,403 B2). https://doi.org/10.1016/j.(73)

Rehabtec. (2020). *SISTEMA DE MONITOREO DINÁMICO PUENTE PUMAREJO*.

Rooke, A. (2005). *S2_Guidelines for Monitoring of Existing Structures*.

Setchell, C. J., & Sharam, J. A. (2020). *Device and Method to Locate a Measurement Point with an Image Capture Device* (Patent No. 0200529 A1).

SINGER. (n.d.). *Singer's DUAL AXIS inclinometers*.

Society, I. C. (2020). *IEEE Standard for Low - Rate Wireless Networks* (Vol. 2020).

Te.com. (n.d.). *TE*.

Telecommunications Industry Association. (2001). *Ansi/Tia/Eia-568-B.2-2001*. *2*(May), 1–139.

EN PROCESO DE ADOPCION