

Monitoreo de salud estructural en tiempo real de construcciones civiles utilizando tecnología de IoT

Carlos Exequiel Garay¹, Fernando A. Miranda Bonomi¹, J. Eduardo Martel², Miguel A. Cabrera¹, Facundo Andres Isla Calderón^{3,4}, Pablo Mariano Barlek Mendoza⁴, Sergio Eduardo Gutiérrez⁴

1-Laboratorio de Telecomunicaciones, Dpto. de Electricidad, Electrónica y Computación (DEEC), Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán (FACET-UNT).

2-Dpto. de Obras y Construcciones Civiles, FACET-UNT

3-Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONICET)

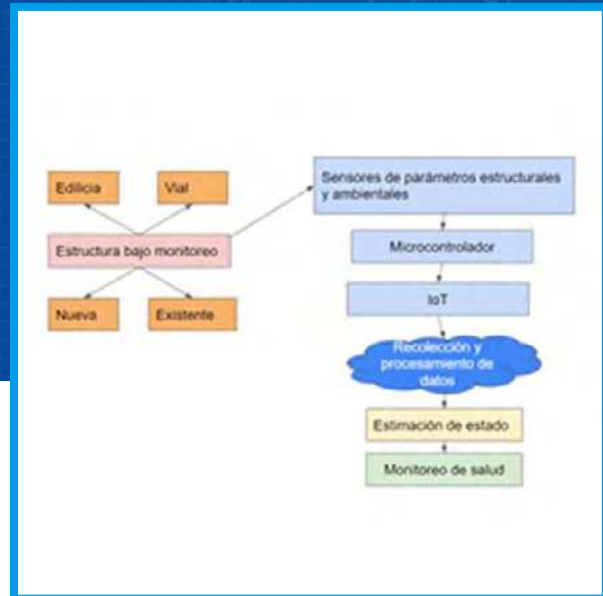
4-Instituto de Estructuras, FACET-UNT

Contacto: kferrando@fra.utn.edu.ar

RESUMEN

Los sistemas de infraestructura civil, como los puentes y los edificios, son activos costosos de nuestra sociedad. Dado que se deterioran con el tiempo, vigilar su estado y proporcionar alarmas a tiempo es de vital importancia. Los sistemas tradicionales de supervisión del estado de las estructuras suelen utilizar cables para enviar los datos de los nodos de los sensores a un servidor in situ. Estos sistemas basados en cables tienen algunas limitaciones intrínsecas, como el alto costo y un largo tiempo de despliegue. Los sistemas basados en Internet de las Cosas (IoT) que utilizan redes de sensores inalámbricos (WSNs) empiezan a ganar más y más atención debido a su bajo costo y facilidad de despliegue. Sin embargo, el diseño de este tipo de sistemas inalámbricos se enfrenta a algunos desafíos que deben ser abordados cuidadosamente.

El monitoreo de la salud de las estructuras civiles (Structural Healthy Monitoring, SHM), tiene como ventaja su bajo costo, un fácil despliegue y puede brindar información detallada acerca de la condición de la estructura, frente a redes de sensores cableadas que se usan principalmente en di-



ques, túneles y puentes de gran longitud, etc.

En la actualidad, se utilizan sistemas de medición, instrumentados con múltiples sensores interconectados, conocidos como redes de sensores, los cuales integran avances en tecnología electrónica, de comunicación y de computación, permitiendo utilizar redes interconectadas de dispositivos de medición, buscando obtener mediciones más precisas y distribuidas tanto espacial como temporalmente. Se compara la implementación de los sensores aptos para Internet de las Cosas (IoT) frente a sensores cableados de muy alto costo y con equipos adquirentes de datos voluminosos y con un alto consumo energético.

ABSTRACT

Civil infrastructure systems, such as bridges and buildings, are costly assets of our society. As they deteriorate over time, monitoring their condition and providing timely alarms is of vital importance. Traditional systems for monitoring the condition of structures typically use cables to send data from sensor nodes to an on-site server. These cable-based systems have some intrinsic limitations, such as high cost and long deployment time. Internet of

Things (IoT) based systems using wireless sensor networks (WSNs) are starting to gain more and more attention due to their low cost and ease of deployment. However, the design of such wireless systems faces some challenges that need to be carefully addressed.

Structural healthy monitoring (SHM) has the advantage of low cost, easy deployment, and can provide detailed information about the condition of the structure, as opposed to wired sensor networks that are mainly used in dams, tunnels, and long bridges, etc.

Currently, measurement systems are used, instrumented with multiple interconnected sensors, known as sensor networks, which integrate advances in electronic, communication and computer technology, allowing the use of interconnected networks of measurement devices, seeking to obtain more accurate and distributed measurements both spatially and temporally. The implementation of sensors suitable for the Internet of Things (IoT) is compared to very high-cost wired sensors and bulky data acquisition equipment with high energy consumption.

INTRODUCCIÓN

Las construcciones civiles se ven sometidas de manera permanente a esfuerzos propios de su funcionamiento y a otros provocados por acciones externas, como ser solicitaciones inducidas por viento, movimientos telúricos, asentamientos del terreno, entre otros. Ante estas demandas, las construcciones experimentan deformaciones que son demostrativas del comportamiento de sus estructuras resistentes. Para determinado tipo de construcciones, resulta de interés conocer dicho comportamiento en el tiempo, para lo cual el registro sistemático de las deformaciones resulta fundamental.

Las tecnologías actuales permiten la adquisición y transmisión continua de datos y la gestión y procesamiento de los mismos para generar información útil para los análisis estructurales. Instrumentos y sensores inalámbricos y otros recursos asociados con microelectrónica, *IoT*, *Big Data* y tecnología digital, en un marco metodológico adecuado, podrían configurar una Caja Negra descriptiva del comportamiento de la edificación a la manera de las aeronaves: un sistema de adquisición, almacenamiento y gestión de datos que permita tener un registro en tiempo real de las variables características de un edificio que permitan describir su comportamiento y la detección de situaciones anómalas, tanto a nivel local de elementos estructurales, como a nivel global de la construcción.

La información generada por tal sistema no ne-

cesariamente debe asociarse a análisis forenses de colapsos o situaciones trágicas como las que suceden esporádicamente alrededor del mundo -edificio *Champlain Towers South*, un ejemplo reciente-, sino que proveería por un lado una valiosa fuente de comparación para contrastar las hipótesis y resultados de los métodos de análisis estructural vs. los comportamientos reales de los edificios construídos, y por el otro, permitiría contar con registros valiosos de cara a prevenir situaciones de riesgo. La implementación en el sistema del concepto de alerta temprana usada para las inundaciones o eventos similares, podría dar lugar a la detección de problemas de desplazamientos o deformaciones excesivas que impliquen probabilidad de inestabilidades o demandas de resistencia por encima de las previstas de acuerdo al diseño estructural.

Un edificio, ya sea público o privado, cumple funciones que en definitiva tienen una función social. Las afectaciones en las funciones de las construcciones implican perjuicios significativos. Las empresas aseguradoras exigen cada vez más diseños estructurales de calidad, que garanticen el buen comportamiento y funcionalidad de los edificios a lo largo de la vida útil de los mismos. La instalación de dispositivos tecnológicos de monitoreo de comportamiento y de detección de situaciones anómalas generaría un plus para las edificaciones que los adopten, constituyendo una inversión rentable en un marco adecuado de gestión de riesgos de acuerdo a las metodologías actuales para construcción segura.

Debido al avance en la tecnología electrónica de los sensores aptos para Internet de las Cosas (IoT) en lo referido a bajo consumo, confiabilidad y bajo costo, es que se analizó su implementación en el laboratorio de ensayo de estructuras (UNT-FACET) frente a sensores cableados de muy alto costo y con equipos adquirentes de datos voluminosos y con un alto consumo energético. Este sistema de monitoreo de salud estructural incorpora acelerómetros, giróscopos, medición de temperatura, humedad, y medición de fisuras en las estructuras, junto con un microcontrolador con módulo de comunicaciones incorporado, para enviar los datos a la nube para su posterior procesamiento y visualización del comportamiento dinámico de la estructura.

Desarrollo

IoT permite en virtud de la interacción automática entre dispositivos tales como chips de identificación por radiofrecuencia (RFID), redes de sensores inalámbricos (WSN) y teléfonos móviles, generar aplicaciones de automatización del hogar (domó-

tica), telemedicina, supervisión ambiental, red eléctrica inteligente (Smart grid), ciudades inteligentes (Smart cities), coches autónomos, etc. Una de las principales tecnologías que posibilitan el desarrollo de la IoT es la conectividad inalámbrica ubicua mediante dispositivos móviles. Por eso, su auge es acompañado por el explosivo crecimiento en el número de dispositivos móviles para proveer conectividad a un masivo número de objetos diversos.

El paradigma IoT comúnmente utilizado en SHM está basado en tres puntos principales que se aplican a los objetos inteligentes (sensores en nuestro caso), que son los siguientes:

1. Debe ser indetectable
2. Se debe poder comunicar
3. Debe interactuar

Estos puntos deben ser respetados asegurando la creación de las redes entre objetos, usuarios finales y otros. [1]

El monitoreo de la salud de las estructuras civiles, (SHM) mediante IoT, tiene como ventaja su bajo costo, un fácil despliegue y puede brindar información detallada acerca de la condición de la estructura, frente a redes de sensores cableadas que se usan principalmente en diques, y puentes de gran longitud, etc.[1]

Las estructuras civiles, como los diques, los puentes de gran longitud, los edificios, etc. son componentes críticos de la infraestructura económica e industrial. Por lo tanto, es importante vigilar su integridad y detectar/señalar cualquier posible daño antes de que éste alcance un estado crítico.

En la provincia de Tucumán se produjeron diferentes derrumbes tanto de puentes, como de estructuras que forman parte del patrimonio de la misma. En el año 2021 se desalojó el Mercado del Norte, que es el principal centro de compras de verduras y carnes de Tucumán, por el colapso de dos columnas, donde los peritos determinaron el peligro de derrumbe. Los trabajos de reforzar, modificar, remodelar o demoler, están valuados en más de 1100 millones de pesos. Esto además implicó que cientos de familias quedarán sin sus fuentes laborales.

Otro patrimonio histórico de Tucumán como lo es la Iglesia San Francisco construida en el año 1767, se enfrenta a serios peligros de derrumbe, por una fisura interna del templo. En su interior, se guardan objetos históricos como por ejemplo la mesa donde se firmó el acta de la Independencia de Argentina, la primera bandera nacional argentina enarbolada en Tucumán el 8 de octubre de 1812 y el altar mayor que fue realizado por indígenas de Misiones. Frente al altar se encuentra enterrado Monseñor José Agustín Molina, que fue prosecretario del Congreso de Tucumán en 1816. En unas

de las alas del convento tuvieron su alojamiento y enfermería, las tropas de Manuel Belgrano luego de la Batalla de Tucumán.

Técnicas de sensado cableado

El monitoreo de la salud estructural es principalmente de dos tipos, de cortos y largos períodos. Los de corto período son generalmente utilizados en la inspección de rutina anual o en una evaluación urgente después de algunos eventos inesperados como temblores, terremotos, sobrecargas, colisiones, etc. Estos sistemas de análisis de eventos de corta duración suelen instalarse en las estructuras durante unas horas para recoger una cantidad de datos suficientes para el diagnóstico posterior fuera de línea.

La segunda categoría incluye los sensores para el monitoreo de estructuras de larga duración. Los nodos de estos sensores son instalados en las estructuras durante meses o años, dependiendo de las dimensiones de las estructuras y son procesados de forma offline por operadores humanos. En cambio los SHM requieren analizar la condición de salud en tiempo real. Ejemplos de estos son los sensores cableados colocados en puentes de gran extensión.

El principal problema de estos sensores cableados es el alto costo, proveniente del (ADC) que es el conversor analógico digital, la longitud de los cables, los sensores de alto costo y los servidores locales. Adicionalmente, el despliegue de los SHM cableados lleva una gran cantidad de tiempo. Este inconveniente es especialmente evidente en los sistemas SHM utilizados para mediciones de corto plazo. Teniendo en cuenta que la longitud de los cables utilizados en un sistema SHM desplegado en una gran infraestructura civil puede alcanzar miles o incluso decenas de miles de metros, el despliegue puede llevar horas o incluso días para obtener datos de medición sólo durante unos minutos.

Además, al estar limitado por el número de nodos de los sensores y la capacidad del ADC, es bastante común que el sistema SHM se despliegue repetidamente en diferentes áreas de la estructura para llevar a cabo la medición. Esto aumenta drásticamente el costo del despliegue.

IoT para sensado distribuido

En los años recientes, las redes de sensores inalámbricos mediante IoT han incrementado el interés por SHM. Comparado con los sistemas cableados de SHM, las comunicaciones inalámbricas erradican la necesidad del cableado y esto representa una significativa reducción en los costos y un despliegue conveniente. Además, aplicando el

concepto de procesamiento en la nube de IoT se elimina la necesidad de los ADCs.[3][4]

Se propone un sistema SHM esquematizado en la Fig. 1



Figura 1: Sistema SHM mediante IoT

Pruebas en el laboratorio

Se realizaron pruebas de ensayos dinámicos en el Laboratorio de Estructuras que forma parte del Instituto de Estructuras de la FACET-UNT. Es un laboratorio de investigación aplicada en el que se realizan estudios experimentales del comportamiento de estructuras y de sus componentes.

El equipamiento que se utilizó fue el siguiente:

- 1 equipo KYOWA para registros dinámicos, compuesto por:
- 1 oscilógrafo registrador de 6 canales,
- 2 acelerómetros AS-5GB para medición en el eje x e y, el rango de medición de la aceleración es de ± 9.807 to ± 196.1 m/s²

Las pruebas se realizaron en un equipo INSTRON para aplicación de cargas estáticas, variables y con control de deformaciones con gestión asistida mediante computadora y software al efecto, compuesto por:

- Consola de control serie 2180,
- Celda de carga serie 2518-100,
- Actuador hidráulico serie 3375 y
- Subestación hidráulica serie 3460.

Se utilizó una masa de 5 kg con una barra de acero de 1 m, en forma de péndulo invertido (Fig.2). Se colocaron los acelerómetros AS-5GB de alto costo para medición del eje x, como así también a la par el acelerómetro de tipo MEMS. En este caso se trató de MPU6050 de bajo costo, que se conectó al microcontrolador con módulo de comunicaciones WiFi, para su comparación entre los sistemas cableados frente al IoT. Este tipo de acelerómetro conectado al microcontrolador forma parte de lo que será el sistema de la caja negra junto a otros sensores de interés.

La masa empezó a vibrar desde una distancia de 5 cm durante 60 segundos y se obtuvieron 2839 mediciones en cada uno de los ejes x,y,z.

Al resultado de estas mediciones se le aplicó la transformada rápida de Fourier, para poder convertir la señal desde el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.



Figura 2: Equipo Instron con acelerómetros colocados.

Tipos de Registros

A continuación, se muestra la gráfica después de aplicar la Transformada Rápida de Fourier (FFT) al acelerómetro en el eje x:

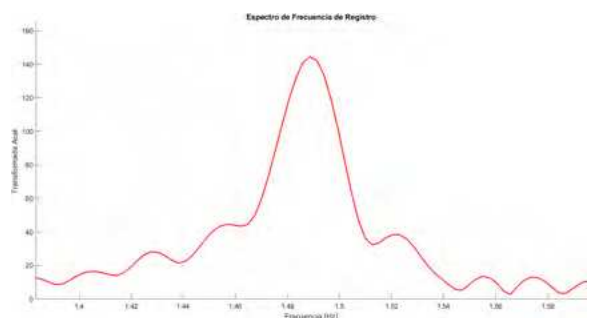


Figura 3: Transformada Rápida de Fourier de la aceleración en el eje x

Como podemos ver en la figura 3, se observa la FFT de la aceleración en el eje x después de un tiempo de 60 segundos y procesado mediante el Software Matlab. En la misma se ve que la frecuencia de oscilación de la estructura está en el orden de los 1,49 Hz, que coincide con lo establecido en el equipo Instron donde se efectuaron las vibraciones.

En el procesamiento de las aceleraciones mediante FFT, se puede comprobar que, incrementando, el número de sensores en los distintos puntos de interés de la estructura a medir se pueden brindar distintos servicios de información del entorno, para análisis, aplicaciones y comunicaciones, que incluyen mediciones sincronizadas, utilizando por ejemplo un reloj en tiempo real. [5]

Calibración de sensores

La calibración se efectuó en este caso al poner el acelerómetro de tipo MEMS en la misma posición que el acelerómetro AS-5GB.

Conclusiones

La incorporación de acelerómetros de bajo costo mediante IoT produce los mismos resultados que acelerómetros para aplicaciones civiles de alto costo de tipo cableado. De esta manera se pueden establecer redes de sensores inalámbricos mediante IoT con el correspondiente procesamiento en la nube que permitiría monitorear la salud de las mismas y evitar enormes costos tanto humanos como materiales.

Agradecimientos

Los autores agradecen a todo el personal no docente y docentes/investigadores del Laboratorio de Estructuras de la UNT-FACET, por su apoyo a las mediciones que se efectuaron.

Referencias

- [1] Miorandi, D. et al. (2012). Internet of things: Vision, applications and research challenges. *Ad Hoc Networks*, 10(7), 1497-1516.
- [2] Barsocchi, P., Cassara, P., Mavilia, F. Pellegrini, D. "Sensing a City's State of Health," *Ieee Consum. Electron. Mag.*, vol. 7, no. 2, pp. 22-31, 2018.
- [3] Rao, A. S., Gubbi, J., Ngo, T., Mendis, P. Palaniswami, M. "Internet of things for structural health monitoring," *Struct. Heal. Monit. Technol. Next-Generation Smart Compos. Struct.*, pp. 89-120, 2016.
- [4] Carni, D.L., Grimaldi, D., Guglielmelli G., Lamona-
ca, F. "Synchronization of measurement instruments co-operating into the W-DMS", *Proc. of IEEE Instr. and Measurement Technology Conference, Warsaw, Poland, 1-3 May 2007*, pp.1-6.
- [5] Lamona, F. et al., "Sub- μ s synchronization accuracy in distributed measurement system by PDA and PC triggers realignment", *IEEE Instr. and Measurement Technology Conf.*, Minnesota, USA, 6-9 May 2013, pp.801-806.