



Received: 24-05-2018
Accepted: 28-07-2018

Anales de Edificación
Vol. 4, Nº 2, 40-47 (2018)
ISSN: 2444-1309
Doi: 10.20868/ade.2018.3778

Sistema inteligente, sostenible e integrado de gestión de estructuras.

Intelligent, sustainable and integrated structure management system.

O. Muñoz, J.C. Sánchez, A. Capelastegui, J. Pérez, J.A. Pérez, P.L. López

Universidad de Zaragoza, La Almunia de Doña Godina (oscar.munoz@tecnalia.com;
jcarlos.sanchez@tecnalia.com; abel.capelastegui@tecnalia.com; jpereze@unizar.es; joanpebe@unizar.es; pllopez@unizar.es)

Resumen— El sistema de monitorización remota Infrasmart diseñado por Tecnalía es usado como base para el desarrollo de supervisión de infraestructuras civiles tanto existentes como de nueva construcción en donde el despliegue de la instalación debe de ser lo menos intrusiva posible. Para conseguir su objetivo el sistema se basa en módulos de adquisición distribuidos con capacidad de comunicación inalámbrica de larga distancia y auto-alimentación orientada a la eliminación del cableado propio de este tipo de instalaciones. A su vez el concentrador de datos gestiona la recepción de la información de dichos módulos y la evacuación de los mismos a un servidor de datos seguro orientado a la supervisión remota de la infraestructura. Actualmente la capacidad de medida de los nodos de adquisición abarca tanto medidas cuasi-estáticas, (sensores de temperatura e hilo vibrante), como medidas dinámicas accionadas por evento, (acelerómetros). En adición existe la capacidad de integrar nuevos sensores conforme a nuevas especificaciones dando como resultado un sistema abierto y escalable en función de los parámetros de interés de la infraestructura a monitorizar.

Palabras clave— Monitorización estructural, sistemas inalámbricos distribuidos, energy harvesting, LORA, sistemas mínimos Linux.

Abstract- The Infrasmart remote monitoring system designed by Tecnalía is used as a basis for the development of supervision of both existing and new construction civil infrastructures where the deployment of the installation should be as unobtrusive as possible. To achieve its objective, the system is based on distributed acquisition modules with long-distance wireless communication capability and self-feeding aimed at eliminating the wiring of these types of installations. At the same time, the data concentrator manages the reception of the information of said modules and the evacuation thereof to a secure data server oriented to the remote supervision of the infrastructure. Currently, the measurement capacity of the acquisition nodes includes both quasi-static measures (temperature sensors and vibrating wire), and dynamic measurements driven by events (accelerometers). In addition, there is the ability to integrate new sensors according to new specifications resulting in an open and scalable system depending on the parameters of interest of the infrastructure to be monitored.

Index Terms— Concrete pavements, recycled concrete, deformation module.

I. INTRODUCCIÓN

Según las prácticas actuales la monitorización de una infraestructura parte en la fase de ejecución de la obra integrando los sensores en función de los parámetros de interés, siendo por norma general sistemas cerrados. Si nos remontamos tiempo atrás podremos observar que existen infraestructuras las cuales carecen totalmente de este tipo de sistemas de supervisión y por ende se confía tanto en el correcto diseño y ejecución de la obra como en las revisiones periódicas previstas en el plan de mantenimiento.

Actualmente existen numerosas tecnologías para la monitorización estructural las cuales pueden ser usadas tanto para ensayos puntuales como para monitorizaciones permanentes, no obstante, uno de los mayores inconvenientes de la implementación de este tipo de sistemas es el coste de integración del mismo. El análisis de costes totales de monitorización en sistemas cableados puede rondar los 5000 dólares por punto de medida según informe proporcionado por Celebi (Celebi, 2002), siendo de hasta 8 millones de dólares la estimación asociada a la monitorización de 350 puntos de medida en el puente colgante de Tsing Ma en Hong Kong (Farrar, 2011).

La aplicación de nuevas tecnologías basadas tanto en sistemas inalámbricos como en sensorica de última generación permiten cubrir las necesidades de monitorización actuales con un coste de integración mucho más bajo que los equivalentes tradicionales (Shinae et al., 2010; Soojin et al., 2010). No obstante, actualmente la integración de sistemas comerciales inalámbricos de monitorización continua asocia de manera habitual la alimentación de los dispositivos a la red eléctrica lo cual limita la implementación de este tipo de elementos en infraestructuras menores o de cierta edad en donde la conexión eléctrica no está disponible. La alternativa natural a este inconveniente es la integración de elementos de auto alimentación, comúnmente denominados “Harvesting”, asociados a unas políticas de monitorización orientadas al bajo consumo que permiten la operatividad del sistema con independencia de la infraestructura a monitorizar (Rosing et al., 2008).

Con objeto de solventar los inconvenientes descritos, Tecnalia ha desarrollado un sistema de monitorización estructural inalámbrico, autoalimentado, remoto y seguro para poder ofrecer servicios de monitorización remota, escalable y extrapolable a todo tipo de infraestructura tanto existente como de nueva obra. El proyecto se está realizando en el marco del proyecto “SISGES, Sistema Inteligente, Sostenible e integrado de Gestión de Estructuras”, financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad en el PLAN NACIONAL DE I+D+I dentro de la convocatoria de RETOS-COLABORACIÓN.

II. DESARROLLO DEL SISTEMA INFRASMAART

A. Características fundamentales

El sistema Infrasmart se soporta en cuatro pilares fundamentales.

- Sistema remoto y seguro. Es posible la consulta de los datos generados por el sistema de manera remota desde cualquier parte del mundo.
- Sistema con conexión inalámbrica: se suprime todo el cableado existente típico de cualquier monitorización. Los nodos de instrumentación se comunican con el concentrador a vía radio de altas prestaciones basada en la tecnología LORA.
- Sistema autoalimentado: se recurre a técnicas de energy harvesting y programación de bajo consumo para hacer posible que tanto el concentrador de datos como los nodos de monitorización puedan operar de manera autónoma y permanente a lo largo del tiempo sin necesidad de conexión a la red eléctrica.
- Sistema distribuido y escalable. El diseño propio del sistema permite añadir puntos de medida adicionales sin gran esfuerzo gracias a las técnicas de plug'n'play.

Las ventajas potenciales de Infrasmart se orientan en su mayoría a la simplificación de la integración del sistema en infraestructuras. La eliminación del cableado junto con la capacidad de autoalimentarse permite un planteamiento de ingeniería de instalación más sencillo y por ende más económico. Al ser un sistema escalable y abierto, Infrasmart permite la inserción de sensores adicionales de cualquier índole en función de las posibles necesidades de supervisión.

La conexión remota al sistema permite la monitorización en tiempo real de la infraestructura, así como la interacción con la misma de cara a la programación de umbrales de alarma/supervisión y programación de eventos susceptibles de interés tales como paso de vehículos de gran tonelaje o sobreoscilaciones de la infraestructura.

La escalabilidad del sistema permite a su vez el desarrollo de nuevos tipos de transductores en función de los parámetros físicos de interés e incluso la integración en el sistema, gracias a su procesador embebido, de las conexiones necesarias con sistemas ya existentes tales como estaciones de aforo de carreteras, sistemas de señalización o seguridad los cuales pueden aportar datos adicionales para una mejor interpretación de los resultados.

B. Topología del Sistema

La topología del sistema se basa en una red en forma de estrella en donde existe un concentrador de datos el cual hace la función de colector de la información de los diferentes nodos de medición o sistemas auxiliares (figura 1). Dicho concentrador es el encargado de generar la base de datos de

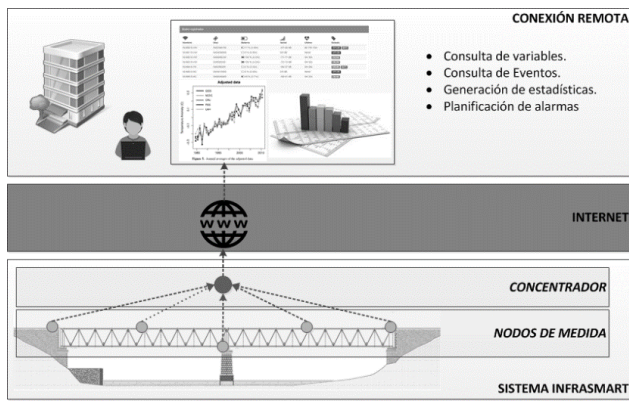


Fig. 1. Topología del Sistema INFRASmart.

sistema y de mantener la conexión remota a la vez que es capaz de generar alarmas programables en función de los eventos de interés.

En esta primera fase de desarrollo se han integrado al sistema, en adición a los nodos específicos desarrollados, un elemento auxiliar compuesto por una estación meteorológica comercial. Dicha estación meteorológica aporta la información de contorno de la infraestructura mientras que los nodos de medida se integran en función de las necesidades de monitorización específicas de la infraestructura.

C. Modos de trabajo del sistema Infrasmart

Existen dos modos de trabajo en lo referente a los nodos de medición, uno estático y otro dinámico. El modo estático permite observar las variaciones de las magnitudes físicas con

un lapso de tiempo programable de entre 5 minutos y una hora y resulta ideal para las observaciones de parámetros cuasi estáticos tales como la temperatura de la estructura o el desplazamiento de las juntas de dilatación. El modo dinámico permite programar al sistema adquisiciones de eventos a una velocidad de adquisición relativamente elevada, que actualmente se establece en 100Hz, durante un periodo determinado de 5sg. Los nodos de medición entran en modo dinámico por la detección de vibración en la infraestructura, (ej. Paso de vehículos pesados), y permite capturar las señales de los acelerómetros con objeto de analizar la frecuencia natural de la infraestructura o la sobre oscilación de la misma. Estos parámetros pueden permitir tanto el estudio de la fatiga de la infraestructura como posibles desviaciones en su frecuencia natural provocadas por un cambio estructural.

D. Nodo concentrador

El nodo concentrador se basa en una arquitectura de procesador embebido de altas prestaciones y bajo consumo que permite al sistema elaborar tareas de computación de alto nivel. Sus interfaces de comunicación principales se orientan al uso de modem 3G para las comunicaciones remotas y a dos interfaces inalámbricas de altas prestaciones a través de los cuales se realizan las conexiones tanto con la estación meteorológica como con los nodos de medición del Sistema (figura 2). Opcionalmente existen interfaces serie y ethernet adicionales para posibles conexiones con sistemas auxiliares.

Todo el bloque del nodo concentrador se alimenta a través de una batería de altas prestaciones soportada por una célula solar que permite al sistema estar encendido y conectado

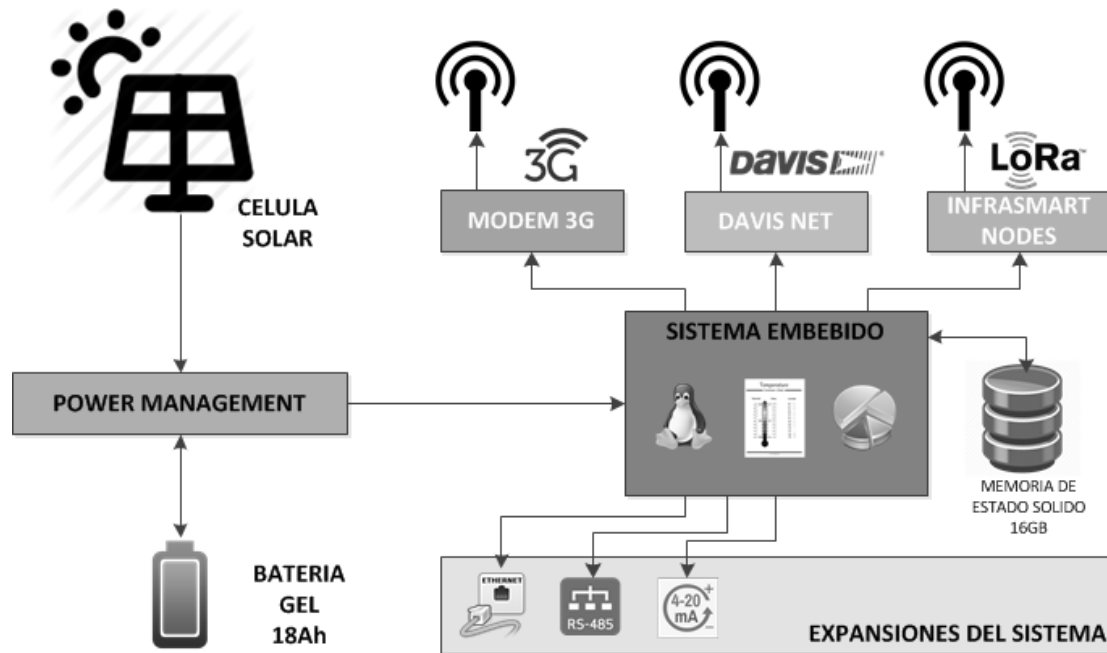


Fig. 2. Esquema topográfico del nodo Concentrador.

permanentemente.

El software funcional se compone de un sistema mínimo Linux que funciona sobre un dispositivo con procesador ARM y que permite la ejecución de un sistema operativo completo con unas prestaciones medias y unos requerimientos muy bajos. La potencia de cálculo de este dispositivo permite la conexión tanto con los módulos de medición como con sistemas auxiliares externos y la gestión de los datos se realiza a través de bases de datos en formato SQLite.



Fig. 3. Set de instrumentos de la estación meteorológica. Imagen: www.davisnet.com.

Otra característica destacable es la ejecución de un servidor web que permite la administración y supervisión remota, a la vez que existe la capacidad de automatizar la exportación de datos a centros de supervisión externos.

E. Estación meteorológica

Debido a que las condiciones meteorológicas de contorno pueden llegar a ser vitales a la hora del estudio de comportamiento de la infraestructura se ha incorporado al sistema Infrasmart una estación meteorológica comercial de altas prestaciones (figura 3). A través de este sistema auxiliar se adquieren variables tales como temperatura, humedad, velocidad y dirección de viento, presión barométrica y condiciones pluviométricas. La adición de este elemento al sistema es opcional y existiría la posibilidad, en el caso de que estuviese disponible, de descargarse la información meteorológica de la estación AEMET o similar más cercana a la propia infraestructura.

F. Nodos de medición Infrasmart

Los nodos de instrumentación se basan en una arquitectura de microcontrolador de bajo consumo encargada de la recolección de los datos provenientes de los sensores. Actualmente existen dos variantes de módulos correspondientes a medidas de temperatura basadas en termopar y a medidas basadas en sensores de hilo vibrante (figura 4).

Por defecto el nodo de medida se encuentra en estado de reposo siendo los únicos bloques activos de manera permanente los correspondientes al recolector de energía y al monitor de eventos. En el caso de producirse un evento de tiempo el nodo de medida se activará midiendo los sensores

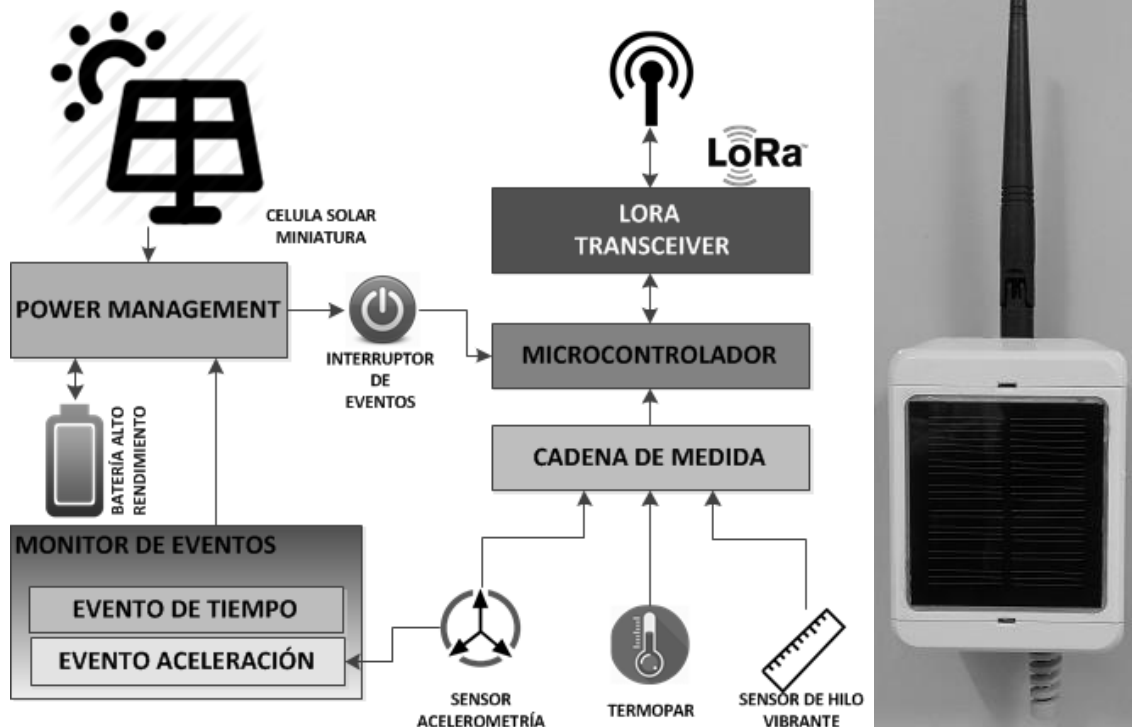


Fig. 4. Esquema topográfico del Nodo de instrumentación.

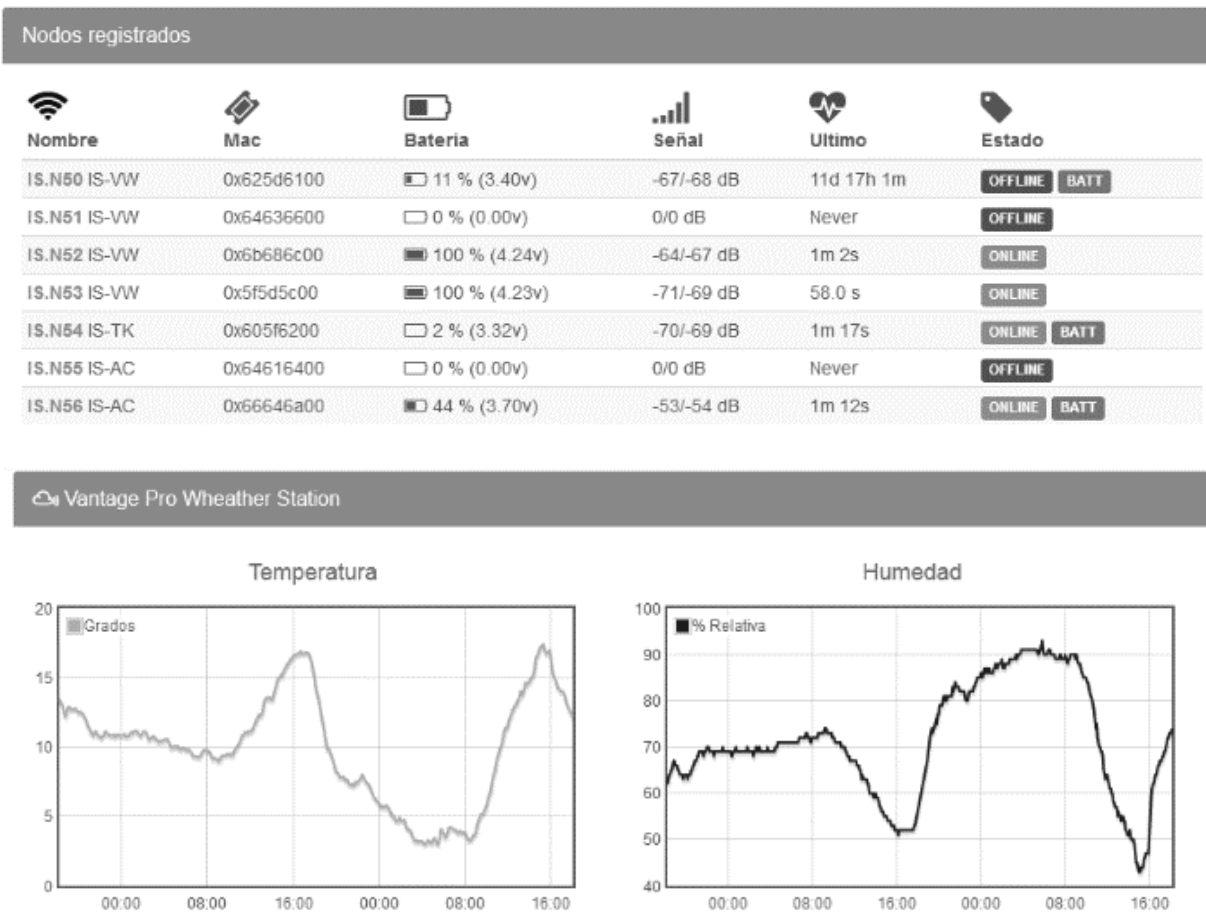


Fig. 5. Portal de administración del Sistema Infrasmart.

asociados y retransmitiendo los resultados al concentrador para luego volver al estado de reposo, este modo de trabajo corresponde al modo de medido estático y es configurado por el usuario. A su vez es posible programar eventos de aceleración a través del cual el nodo entra en modo dinámico en el instante en que el acelerómetro rebasa un umbral de aceleración, (ej. Paso de vehículo pesado). En este caso el nodo recolectará las medidas de acelerometría correspondientes al evento retransmitiendo el archivo generado al nodo colector para su análisis.

Con el diseño realizado existe la posibilidad de integrar medidas provenientes de otros tipos de sensores como galgas extensométricas o células de carga mediante la reprogramación del nodo de medida sin necesidad de nuevos desarrollos.

G. Conexión remota

El nodo concentrador dispone de un modem 3G, lo que permite conectarse a internet de forma controlada para la evacuación de los datos adquiridos a almacenes definitivos, al mismo tiempo permite conectarse a ella mediante una dirección pública de internet. Con las credenciales adecuadas, y una

conexión segura, su administración se realiza completamente vía portal web.

También dispone de un interfaz para que terceras aplicaciones puedan obtener datos del sistema de forma periódica con el fin de supervisar y/o generar alarmas en función de los datos registrados en tiempo real.

H. Portal de administración

El usuario del portal de administración tiene a su disposición una serie de operaciones que puede realizar a través de una interfaz que varía en función de los niveles de acceso, es decir, un usuario administrador puede realizar operaciones de configuración y mantenimiento de datos, mientras que un nivel de acceso de usuario solo permite la consulta y descarga de datos (figura 5).

Las operaciones destacables son el poder configurar íntegramente el sistema de forma remota, observar en tiempo real los valores adquiridos, los estados de los módulos, niveles de señal, carga de baterías, uso de espacio, etc., así como visualización gráfica y selectiva de datos o su descarga.

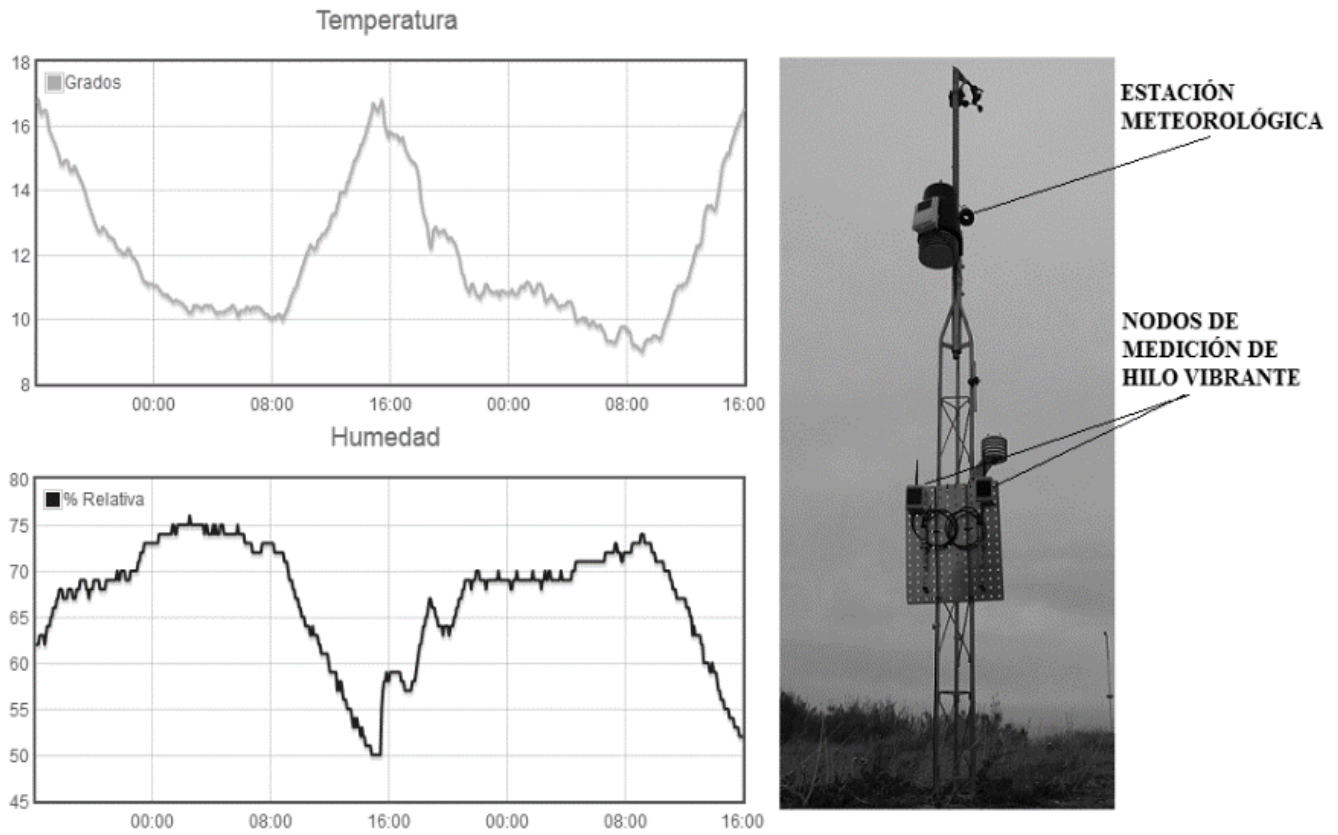


Fig. 6. Estación meteorológica y nodos de medida basados en sensores de hilo vibrante.

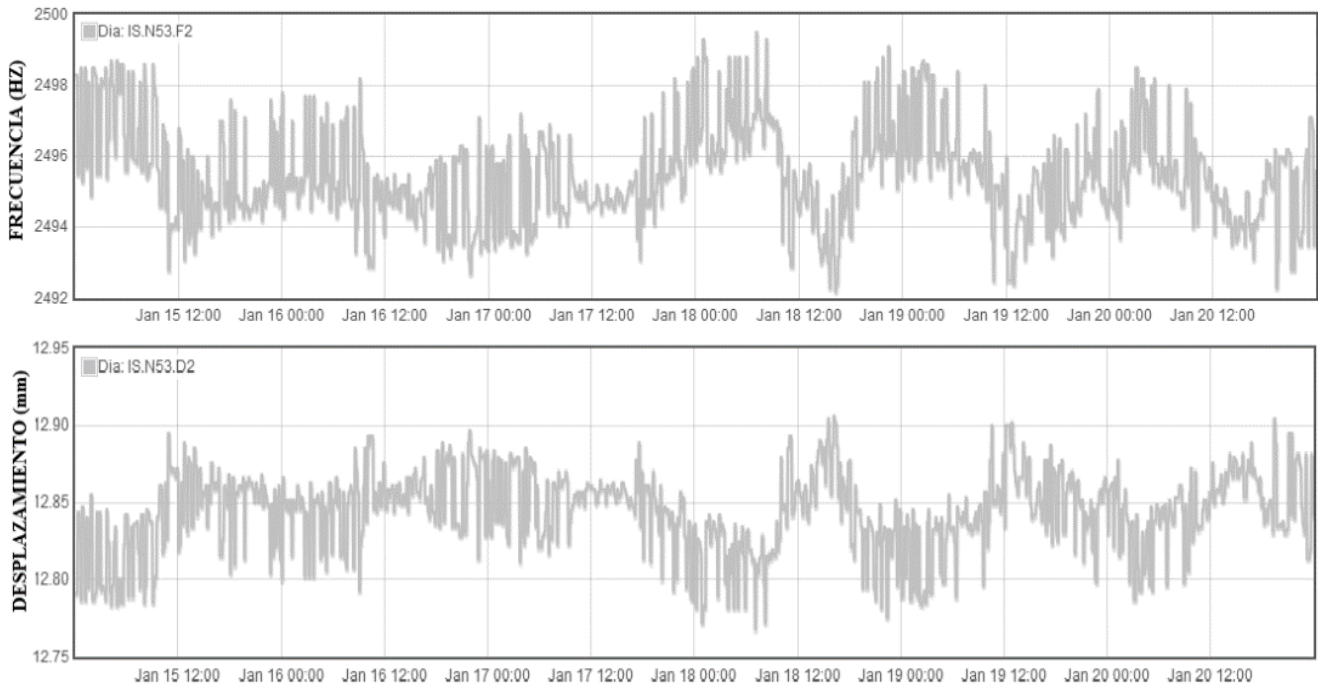
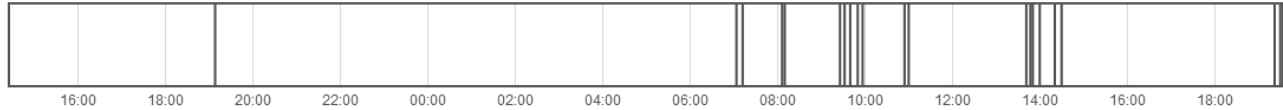


Fig. 2. Comportamiento sensor de hilo vibrante, (1 semana)

Contador de Eventos



Visualización de Evento de aceleración

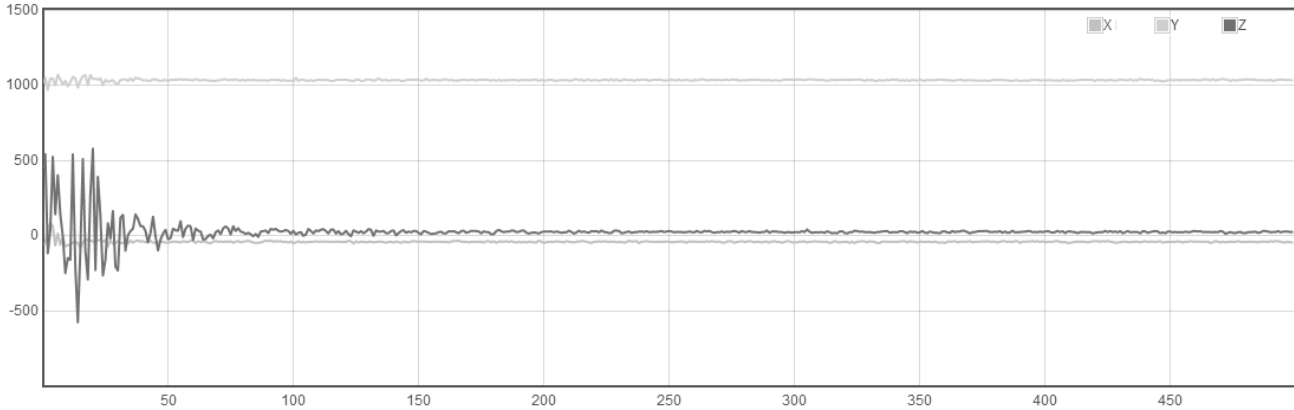


Fig. 3. Contador de eventos y visualización de la respuesta del acelerómetro triaxial, (en mg).

III. PRUEBAS EN LABORATORIO

El sistema ha sido probado en laboratorio distribuyendo tanto en ambiente exterior como en interior los nodos de medida del Sistema INFRASmart. Durante dichas pruebas se han desplegado la estación meteorológica y 7 nodos de medida específicos siendo 4 de ellos de medida de hilo vibrante (figura 6), 2 de detección de paso de vehículos (figura 7) y 1 de medida de temperatura de estructura. La configuración general del sistema de medición se ha establecido con un periodo de activación de 10 minutos y un umbral de evento de aceleración de 100mg.

A. Modo de medida dinámico. Eventos de vibración captados por los acelerómetros

Para simular en laboratorio el detector de paso de vehículos pesados se han dispuesto los nodos de acelerometría en los marcos de puerta de entrada a las oficinas de tal manera que se

ha podido monitorizar las entradas y salidas del personal. Observando en detalle los eventos generados se ha podido observar el impacto de cierre de la puerta y la respuesta en amplitud del evento (figura 8).

B. Comportamiento de las baterías de los nodos

El comportamiento de las baterías de los nodos de instrumentación situados en exteriores se ha mantenido constantes y sin apreciar descargas significativas de la misma. Las baterías utilizadas para alimentar a los nodos poseen un voltaje nominal de 3.6V, (3600mV), con un voltaje de carga máximo de 4.2V, (4200mV). En la figura 9 se puede apreciar las cargas de batería en las horas de luz y la progresiva descarga en las horas nocturnas.

IV. CONCLUSIONES

Los resultados aportados por el sistema durante el ciclo de pruebas en laboratorio resultan esperanzadores, no obstante, quedan pendientes de realizar las correspondientes pruebas en

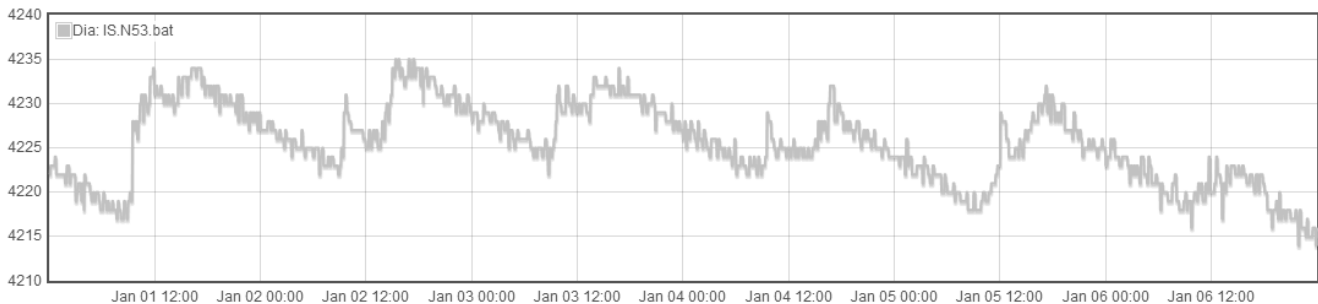


Fig. 4. Carga y descarga de baterías del nodo 53, (en mV).

entorno real las cuales se deberán de ejecutar en los próximos meses. En líneas generales las respuestas de los modos de medición estático y dinámico han sido positivas, aunque se ha observado la necesidad de ajustes de disparo del modo dinámico, (acelerómetros). Puede existir la posibilidad de falsos positivos en el caso de que el umbral de alarma se configure demasiado sensible, (por debajo de 100mg).

En comparación con sistemas comerciales equivalentes, como los ofrecidos por microstrain, (<http://www.microstrain.com>), o libelium, (<http://www.libelium.com>), el sistema Infrasmart adolece hasta la fecha de no contar con tanta capacidad de integración de sensores. En contrapartida el sistema desarrollado orienta su diseño exclusivamente a la monitorización estructural y en especial al uso de la tecnología de hilo vibrante tan extendida en el campo de la obra civil y ausente en las plataformas mencionadas. A su vez, y gracias al uso de un desarrollo computacional basado en linux, el sistema Infrasmart es capaz de realizar iteraciones con otros sistemas para aportar información adicional específica de relevancia. En este aspecto el desarrollo efectuado no pretende sustituir sistemas altamente especializados, sino que dichos elementos son usados como complemento para un análisis de comportamiento estructural más profundo.

En conclusión, podremos afirmar que el sistema Infrasmart puede ser usado tanto en aplicaciones puntuales o ensayos específicos como en instalaciones permanentes con un mínimo impacto económico adaptándose de la mejor manera posible a la infraestructura específica a monitorizar.

REFERENCIAS

- Celebi, M., 2002, "Seismic instrumentation of buildings (with emphasis on federal buildings)". Special GSA/USGS Project, an administrative report.
- Farrar, C.R., 2011, "Historical Overview of Structural Health Monitoring. Lecture Notes on Structural Health Monitoring Using Statistical Pattern Recognition", Los Alamos Dynamics: Los Alamos.
- Rosing, Tajana; Todd, Michael; Farrar, Charles; Hodgkiss, William. (2008). "Energy Harvesting for Structural Health Monitoring Sensor Networks". *Journal of Infrastructure Systems - J INFRASTRUCT SYST.* 14. 10.1061/(ASCE)1076-0342(2008)14:1(64).
- Shinae Jang;, Hongki Jo; Soojin Cho; Kirill Mechitov; Jennifer A. Rice; Sung-Han Sim; Hyung-Jo Jung; Chung-Bang Yun; Billie F. Spencer, Jr; Gul Agha. "Structural health monitoring of a cable-stayed bridge using wireless smart sensor technology: Deployment and evaluation". *Smart Structures and Systems*, Vol. 6, No. 5-6 (2010).
- Soojin Cho; Hongki Jo, Shinae Jang; Jongwoong Park; Hyung-Jo Jung; Chung-Bang Yun; Billie Spencer; Ju-Won Seo. (2010). "Structural Health Monitoring of a Cable-Stayed Bridge Using Wireless Smart Sensor Technology: Data Analyses". *Smart Structures and Systems.* 6. 10.12989/sss.2010.6.5_6.461.



Reconocimiento – NoComercial (by-nc): Se permite la generación de obras derivadas siempre que no se haga un uso comercial. Tampoco se puede utilizar la obra original con finalidades comerciales.