

## **ESTADO DEL ARTE EN MONITORIZACIÓN DE SALUD ESTRUCTURAL: UN ENFOQUE BASADO EN AGENTES INTELIGENTES**

### **STRUCTURAL HEALTH MONITORING: AN INTELLIGENT AGENT APPROACH**

*Andrés Felipe Quintero Parra*

Ingeniero electrónico, Docente de cátedra de la Universidad Industrial de Santander,  
Bucaramanga, Colombia. andresfelquintero@yahoo.com

*Rodolfo Villamizar Mejía*

Ph.D., Dr. en Tecnologías de la Información, Ingeniero electricista, Ingeniero electrónico, Coordinador académico de posgrados, Docente de control clásico, digital y avanzado en pregrado y posgrado e investigador del grupo CEMOS de la universidad industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.  
rovillam@uis.edu.co

**Fecha de recepción:** 6 de abril de 2010

**Fecha de aprobación:** 28 de mayo de 2010

### **RESUMEN**

Este artículo presenta una revisión del estado del arte reportado en literatura sobre las técnicas utilizadas en Monitorización de Salud Estructural para detectar y localizar daños, así como los dispositivos electrónicos que se usan para efectuarla. Además, incluye una revisión de las aplicaciones de los agentes inteligentes en diferentes áreas de la ingeniería para solucionar problemas con información distribuida. Por último, revisa las aplicaciones de los sistemas de multiagentes inteligentes en Monitorización de Salud Estructural, con el fin de encontrar las tendencias de los sistemas de monitorización y determinar los problemas que no han sido solucionados en esta área.

**Palabras Clave:** agentes inteligentes, monitorización de salud estructural, supervisión experta.

### **ABSTRACT**

This article presents a review of the state-of-the-art on damage detection and damage location techniques commonly used for Structural Health Monitoring and some of the electronic systems used for it. On another hand, a review of intelligent agents' applications

is shown, focusing on the solution of distributed information problems. Finally, a review of intelligent agents' applications on Structural Health Monitoring is presented to obtain the systems' tendencies and define the unsolved problems on this area.

**Keywords:** intelligent agents, structural health monitoring, monitoring, expert supervision.

## INTRODUCCIÓN

Los daños en estructuras civiles han causado innumerables desastres en el transcurso de la historia, por lo cual han llamado la atención de la comunidad relacionada con las técnicas de construcción y mantenimiento de estructuras.

En todo momento, los edificios y puentes se están deteriorando, y se pierden así su utilidad y beneficio para el ser humano, por lo cual es importante preguntar: ¿Existe alguna forma de conocer estos daños para prevenirlos, corregirlos y conocer el tiempo de vida útil que posee cada estructura? Para responder esto, se ha desarrollado un área de investigación conocida como monitorización de Salud Estructural (Structural Health Monitoring o SHM), que busca evaluar en línea las condiciones dinámicas de las estructuras para determinar, localizar y cuantificar daños en la misma, además de predecir la vida útil de la estructura.

En la monitorización existen dos tipos de daño, lineal y no lineal [1]. El daño lineal es aquel que sufre una estructura pero que no le hace perder sus propiedades elásticas, por lo cual las ecuaciones que representan el movimiento de la estructura total pueden seguir siendo utilizadas. El daño no lineal es aquel en el cual las ecuaciones de movimiento cambian por completo, debido a una variación en la respuesta natural de la estructura. Por lo general, la monitorización de salud estructural se realiza, tomando en cuenta el daño lineal debido a las dificultades en el modelado con daño no lineal, por ejemplo: para describir el movimiento de una viga agrietada [1]. Los métodos de detección según Rytter [2], se clasifican en cuatro niveles:

Nivel 1: Determinación de la existencia de daño en la estructura

Nivel 2: Nivel 1 más la localización geométrica del daño.

Nivel 3: Nivel 2 más la cuantificación del daño.

Nivel 4: Nivel 3 más la predicción del tiempo de vida restante de la estructura, también conocido como prognosis.

Generalmente, se alcanzan los dos primeros niveles al trabajar con técnicas de identificación modal o de cambios de frecuencia, ya que para el nivel 3 se debe utilizar un modelo estructural que permite comparar y cuantificar el daño de una estructura con respecto de una referencia en buen estado. El nivel 4 por lo general trata con la fatiga

mecánica y otros temas que requieren de técnicas mucho más complejas, por lo cual no existen muchos trabajos en esta área.

Para realizar la monitorización de grandes estructuras, se requiere de un sistema de monitorización, ya que cuantificar propiedades físicas de manera visual o con métodos acústicos es difícil. Desde el punto de vista de la ingeniería estructural, los sistemas de monitorización deben ser operados remotamente y deben poseer un procesamiento de datos in situ, así como una forma sencilla y simple de instalación y mantenimiento. También deben poseer las técnicas de detección de daños incorporadas, lo mismo que un sistema de alerta en caso de una falla de energía y una base de datos que permita revisar los antecedentes de cualquier falla [3][4].

Los agentes inteligentes son algoritmos que pueden proveer un sistema descentralizado, automático y autónomo, con operación remota y a la vez realizar SHM en línea [5]. El reto de esta técnica es decidir adecuadamente sobre variables tales como el tipo de interconexión, orden jerárquico, tipo de agentes para utilizar, la conexión física entre los agentes, su función específica, entre otros, de tal manera que su aplicación resulte efectiva [6].

## 1. MONITORIZACIÓN DE SALUD ESTRUCTURAL

La monitorización de salud estructural se ha trabajado desde finales del siglo XIX, cuando los trabajadores de las vías escuchaban las emisiones acústicas de la misma a fin de detectar fallas o grietas. Estas técnicas de reconocimiento visual o auditivo, son las alternativas más utilizadas cuando se carece de la tecnología para realizar un estudio más adecuado. Gracias al avance computacional de los últimos 30 años, se han desarrollado varias técnicas basadas en principios físicos y análisis más profundos, con respecto de los realizados en épocas anteriores [7].

Existen algunas técnicas basadas en la utilización de la transformada Wavelet para identificar discontinuidades en los registros de aceleración, que logran detectar el tiempo exacto del inicio de una falla, según Zou, Z.K., et al [8], o puede encontrar cambios en la matriz de flexibilidad para detectar la existencia de daño según Bernal, D., et al [9], [10]. Dentro de estos trabajos, existen técnicas especializadas en el tratamiento de las señales obtenidas, como la propuesto por Medda, A. et al [11], donde expone un nuevo método para quitar el ruido en las señales obtenidas de los sensores a partir de su varianza, efectuando un proceso de limitación de los coeficientes de la transformada Wavelet antes de su implementación.

Algunas técnicas de monitorización están implementadas para estructuras espaciales o situaciones en las cuales, la monitorización no se puede realizar con facilidad. Por ejemplo: algoritmos genéticos o transformada S utilizados para mejorar la aproximación

del modelo DA (delay attenuation), utilizado para estimar las características de la estructura [12]. Dado que existen tantas y tan variadas técnicas para detectar y/o localizar daños, éstas se pueden clasificar en dos tipos: basadas en la detección de formas modales y en identificación de parámetros según Caicedo [13].

### **1.1. TÉCNICAS BASADAS EN DETECCIÓN DE FORMAS MODALES**

Las formas modales son los diferentes tipos de respuesta que tiene una estructura ante entradas que oscilen a determinadas frecuencias cercanas a la frecuencia natural propia del objeto de estudio de acuerdo con Avitable [4]. Con base en estas respuestas, se puede encontrar las propiedades dinámicas de la estructura, a partir de análisis matemáticos interpretativos como lo explica Caicedo [13].

Para utilizar las formas modales existen técnicas basadas en la obtención de registros de vibración libre como Eigensystem realization algorithm (ERA), y Eigensystem realization algorithm with data correlation (ERA/DC), y existen algunas disponibles para obtener las formas modales, a partir de estos registros como Natural Excitation Technique (NExT). ERA es una técnica que se basa en la mínima realización para obtener un espacio de estados del sistema y fue desarrollada por Juang, et al [14], y comprobada por Lew, et al [15]. NExT es una técnica que permite medir las respuestas libres de una estructura, cuando no se conoce la entrada, como en un terremoto, y fue desarrollada por James, et al [16]. Esta técnica ha sido implementada para encontrar los modos de un puente en Singapur cuando camina una persona, como lo expusieron Brownjohn, et al [17], y también ha sido comparada con otras técnicas como la de excitación forzada, por medio de un promedio normalizado de densidades espectrales de potencia, para optimizar un modelo de elementos finitos de un puente, así como lo realizaron Felber, et al [18].

### **1.2. TÉCNICAS BASADAS EN IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS**

La identificación de parámetros consiste en utilizar técnicas matemáticas con el fin de extraer información de cada propiedad de la estructura y utilizar las formas modales. Con este fin, se puede utilizar modelos de Markov escondidos, para determinar el ciclo de vida útil de una válvula específica en una estructura mediante el conocimiento de otras válvulas. Esta técnica se puede interpretar como un clasificador de secuencias que permite, por medio de un análisis matemático, obtener los parámetros deseados por el usuario. La interpretación de los datos puede realizarse por el usuario o por una plataforma que seleccione el secuenciador más apropiado como lo reseñan Constanze Tschope y Matthias Wolff [19].

Las cadenas ocultas de Markov pueden extender su uso para realizar predicciones acerca de la vida útil restante de la estructura, independiente de la característica de daño

utilizada para definir el diagnóstico del mismo, de acuerdo con el trabajo desarrollado por Rammohan, et al [20].

Según Ramses Rodriguez y Luciana R. Barroso [21], se puede obtener los datos de rigidez de un Benchmark mediante un método basado en descomposición en el dominio de la frecuencia (FDD), así como un modelo de haz cortante (shear beam), de acuerdo con el trabajo de Barroso, et al [22], sin la necesidad de usar modelos estadísticos, con lo cual se garantiza que el modelo sea independiente de las variaciones de las formas modales.

De acuerdo con Nguyen et al [23], se puede utilizar una red Bayesiana para determinar la localización de fallas en una estructura. Con esta red, se obtienen altas probabilidades de localizar la falla en comparación con otras técnicas, aunque se debe tener en cuenta que la prueba realizada en el estudio, fue muy simple debido a la naturaleza de la estructura y a la entrada que se utilizó.

### **1.3. IMPLEMENTACIONES ACTUALES**

Conforme han cambiado las técnicas de identificación de daño, así mismo han variado las implementaciones físicas que permiten realizarlas debido a que siempre se busca obtener la mayor cantidad de información posible de la estructura, en un menor tiempo, a un menor costo y con la máxima confiabilidad posible.

Con base en estos parámetros, Jina Kim, et al [24], proponen un sistema de monitorización de salud estructural de bajo consumo de potencia basado en la premisa de la realización del procedimiento in situ y, a su vez de manera constante, lo cual genera un consumo prolongado y, normalmente, elevado de potencia. Se logró la reducción planteada, trabajando con una señal de pulsos digital y rectangular y un método de detección de muestras, para luego validar sus resultados con otro método de detección de daños.

Sujan Kundu, et al [25], proponen una red de sensores que está “atenta” a la potencia consumida, debido a que sus protocolos de comunicación, llamados PADCL-all y PADCL-oe, sólo se activan de acuerdo a la ocasión indicada y se reduce así, el consumo total de un sistema de monitorización continuo basado en una arquitectura distribuida inalámbrica.

William E. Allen y Jeffry N. Sundermeyer [26], revisan un sistema desarrollado por Caterpillar Inc., Motorola Inc., Microstain Inc. y Native American Technologies llamado Structural Health with Integrated Determination (SHIELD), que realiza el manejo de información para máquinas de movimiento terrestre y está basado en sensores y un sistema central para detectar daños y prevenir fallas, es decir, es un sistema experto centralizado.

D. Musani, et al [27], introducen el SHiMmer que es un sistema de monitorización de salud estructural autosostenible gracias a un grupo de supercapacitores que lo hacen autónomo por al menos, dos décadas sin alguna intervención humana, y posee flexibilidad en el posicionamiento de sensores además de técnicas de bajo consumo de potencia, basado en el apagado de los sensores cuando no se encuentran en uso por medio de un protocolo desarrollado para esta aplicación.

Wirtu L. Bayissa, et al [28], presentan el uso de técnicas para detectar daños por medio de frecuencia de banda ancha, comparando sus resultados con las técnicas de frecuencia de resonancia y obteniendo aproximaciones favorables con respecto de los parámetros de un puente.

De acuerdo con Fangmin Li, et al [29], el uso de sensores inalámbricos en SHM es confiable, preciso y ha generado una reducción de costos en la implementación de los sistemas en comparación con los sistemas de monitorización convencionales. Para lograr una comunicación efectiva entre los sensores, se utilizó Ethernet para comunicar los sensores entre sí, y se utilizó el mecanismo de contención de canal utilizado en Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA), que permite que la línea este atenta a cualquier comunicación antes de transmitir, así como la idea del protocolo Reference Broadcast Synchronization (RBS), en el modelo de sincronización de datos.

Bo Chen, et al [30], plantean que el uso de sensores inalámbricos provee una solución aceptable para mediciones de estructuras muy grandes con una serie de sensores que no son muy costosos. Para el diseño del sistema, se utilizó una tarjeta madre Gumstix, una tarjeta de comunicación inalámbrica, una tarjeta de sensores y un software de uso libre llamado CLAPACK para introducir los algoritmos de monitorización en la tarjeta Gumstix. Para la comunicación entre tarjetas, se usó el protocolo SPI en vez del I2C, argumentando que su velocidad de transmisión de datos es mayor y se comprobó con una implementación adecuada sobre un benchmark de prueba.

Song, et al [31], introducen los “agregados inteligentes”, un tipo de sensor piezoeléctrico incorporado dentro de algunas estructuras de concreto para poder realizar una toma de datos confiables in situ, desde puntos clave al interior de la estructura. Con base en ellos, se construye una red de sensores que es puesta a prueba con un sistema de correlación difuso y ejecuta el cálculo de daños que se realiza, utilizando una matriz de índice de daño basada en la transformada Wavelet. Park, et al [32], explican un sistema de monitorización basado en una red de sensores inalámbricos controlados desde un modulo principal, por medio de una interfaz con el usuario llamado Duranode. El sistema está compuesto de dos tarjetas, en donde la principal realiza todas las operaciones y análisis, mientras la tarjeta hija está encargada de recoger la información y organizarla; por tal razón, se logra una reducción en el consumo de potencia al minimizar la latencia de los datos.

Además de estas implementaciones físicas, se han desarrollado aproximaciones útiles para detectar grietas en presencia de ruido, según N. F. Ince, et al [33], utilizando encapsulamiento jerárquico y máquinas de soporte vectorial por el método de tiempo de llegada que utiliza el mismo para determinar la distancia que existe desde el punto de inicio de la emisión hasta la grieta emisora de señales de alta frecuencia. En el artículo, se concluye que el problema de este método de monitorización es que necesita de un desarrollo más profundo para ser utilizado en grandes estructuras, puesto que los modelos son no lineales y las ecuaciones de propagación cambian constantemente.

#### **1.4. ARQUITECTURAS DE AGENTES INTELIGENTES APLICADOS A REDES DISTRIBUIDAS**

Los agentes inteligentes son objetos de trabajos sociales y proactivos que pueden juntarse para conformar una estructura conocida como arquitectura multiagente [34], [35], [36].

Estas estructuras multiagentes pueden interactuar entre sí de diversas formas, de acuerdo con un orden jerárquico o un orden de funcionalidades específicas. Algunas arquitecturas pueden basarse en roles fijos asignados manualmente, tal como la expuesta por Zhu, et al [37], o en roles dinámicos que permiten funciones de recolección de datos como la planteada por Hassan Said, et al [38].

Las diferentes arquitecturas pueden cumplir funciones, como la distribución de datos de una forma más eficiente que una red de sensores según lo presentado por Lander, et al [39], o el control distribuido de un sistema que permita la ejecución concurrente de todas las acciones si fuese necesario, y que asegura una mayor eficiencia del sistema tal como el expuesto en el trabajo de Kong, et al [40].

Para el diseño de una red multiagentes, se presentan varias opciones como JADE, aplicación desarrollada por Bellifemime, et al [41], GoalNet desarrollada por Yu, et al [42], o la técnica de diseño de prometeo (PDT), utilizada por Padgham, et al [43].

Existen trabajos relacionados con el uso de multiagentes para controlar redes de sensores distribuidas tales como el realizado por Horling, et al [44], en el cual se explica cómo trabaja un sistema, utilizando diferentes técnicas organizacionales ante entornos variantes y dinámicos, y se comprueba que la arquitectura multiagentes basada en roles, relaciones de autoridad y grupos de trabajo, puede representar una mejora en cuanto al número de combinatorias totales necesarias para tener una visión general del sistema, es decir, que se necesita una menor cantidad de información para obtener el panorama del sistema deseado.

Rodin, et al [45], presenta una arquitectura multiagente basada en un lenguaje llamado oRis, utilizada para entornos virtuales. La plataforma permite cambios por parte de



los diseñadores ya que posee la flexibilidad para permitir un cambio dinámico y una construcción variante. La interfaz desarrollada permite una interacción con el usuario en todo momento, de tal manera que se pueda agregar o quitar varios tipos de agentes para observar el comportamiento colectivo de los mismos.

Otte, et al [46], introduce Multi-agent Architecture for Coordinated Responsive Observations (MACRO), para afrontar los retos que presenta South East Alaska Monitoring Network for Science, Telecommunications, Education and Research (SEAMONSTER), tales como la ejecución de acciones dependientes del Hardware y los manejos de datos que estas acciones implican. En este trabajo los autores reutilizan una arquitectura conocida como el CORBA component Model (CCM), que distribuye el trabajo de cada agente, de acuerdo con una organización jerárquica.

Gatani, et al [47], utilizan agentes inteligentes para monitorizar ambientes dinámicos como campos de batalla o el movimiento de personas dentro de una edificación adecuada para este fin. Se busca un razonamiento parecido al del ser humano, que reaccione de acuerdo con la situación y proponga una respuesta de acuerdo con la información obtenida por los sensores, a diferencia de un sistema que sólo responda sin tener en cuenta las consecuencias de sus acciones. La base de este trabajo está en Situation Calculus y su capacidad de capturar la dinámica de las acciones circundantes.

De acuerdo con Kazandzhiev, et al [48], una arquitectura basada en JAIN para simulación de entornos para proyección y pruebas de servicios inteligentes, dividida en una parte de sistema y una parte de aplicación, proporciona un mejor rendimiento que una arquitectura convencional de estructurado, ya que estas últimas no poseen flexibilidad ni capacidad de adaptación.

Un uso típico de las arquitecturas de multiagentes es para controlar robots que deben realizar tareas conjuntas como en una olimpiada; aunque su uso comercial sea casi nulo, es conveniente mencionar que utilizan una arquitectura basada en roles en donde cada componente conoce sus capacidades y propone su solución sin algún nivel jerárquico establecido, es decir, todas las soluciones son aceptadas y estudiadas con igual número de relevancia por todos los agentes para tomar la decisión más apropiada, como se observa en los trabajos realizados por Ibarra, et al [49], Fukuda, et al [50] y Jacak, et al [51].

Los agentes inteligentes pueden ser utilizados para tomar decisiones en redes de sensores de gran tamaño, por lo cual se puede ajustar a sistemas de monitorización, ya que estos actúan como redes de sensores distribuidos. La integración de agentes inteligentes con el problema de monitorización estructural, es un tópico de interés ascendente en la actualidad [52].



## 2. SISTEMAS MULTIAGENTES APLICADOS AL PROBLEMA DE MONITORIZACIÓN DE SALUD ESTRUCTURAL

La monitorización de salud estructural se ha trabajado como un proceso centralizado que requiere de un sistema experto para interpretar los datos y coordinar las acciones de los sensores y coordinar la comunicación de datos.

En la última década, ha aumentado el número de aplicaciones inalámbricas en esta área pero se ha mantenido el uso de un sistema experto coordinador. Sin embargo, se han planteado varias alternativas a este tipo de coordinación, debido a que según Yuan, et al [5], un sistema centralizado posee menos velocidad, confiabilidad y diversidad de funciones que un sistema distribuido.

Por esta razón, se ha trabajado sobre la arquitectura multiagentes como solución distribuida para la monitorización según Shi, et al [52]. Se han realizado trabajos al respecto, enfocados a distintos aspectos del sistema tales como la forma de tomar los datos y la distribución de los agentes para monitorizar adecuadamente una estructura, entre otros. Hoschke, et al [53], plantean una técnica de auto organización de datos en un sistema complejo de sensores y procesadores que posibilitan el uso de agentes móviles, tales como robots para localizar las fallas y proveer un mínimo servicio de reparación, teniendo en cuenta que se necesitaría dotar a los robots, con las herramientas adecuadas. El objetivo de la técnica es que el agente móvil sea capaz de adaptarse a los agentes internos de la estructura, sin importar el número de los mismos, pueda interpretar la información obtenida y realizar una acción acorde con la situación.

Yuan, et al [5], explican una tecnología de monitorización paralela basada en redes de sensores inalámbricos y arquitecturas multiagentes para grandes estructuras. La idea principal es utilizar la red de sensores inalámbricos inteligentes como agentes inteligentes individuales y programar la arquitectura multiagente para realizar todo el trabajo ya que de esta manera, se descentraliza la monitorización y se mejora la confiabilidad, velocidad, flexibilidad y funciones de todo el sistema, a la vez que se reduce peso y costo de cableado, debido al uso de tecnología inalámbrica. Se utiliza la plataforma de sensores Berkley Mote Mica y también, siete tipos diferentes de agentes para ejecutar la extracción de parámetros. Zhao, et al [54], diseña una arquitectura multiagentes enfocada exclusivamente a monitorización, explicando uno a uno todos los agentes utilizados, detallando su función ontológica, su finalidad, sus rutas de comunicación, etc., y su funcionalidad dentro del proceso de detección de daños. El diseño de estos agentes se realiza por medio de la herramienta computacional JADE y la arquitectura se plantea de acuerdo con la teoría Blackboard descrita por Corkill [55]. Se especifican también, los diferentes niveles organizacionales que se requieren para realizar una monitorización con esta arquitectura los cuales son los niveles de monitorización de datos, interpretación de los mismos, diagnóstico de daños y el nivel de información que es el único que entra en contacto con el usuario. Taylor, et al [56], plantean el uso de un

agente móvil para mejorar el rendimiento de una red de sensores de monitorización de salud estructural. El agente móvil está encargado de revisar periódicamente los datos de los sensores y posee la capacidad computacional para realizar juicios sobre la condición de la estructura acerca de su estado y acerca de sus fallas. Desde luego, este tipo de agentes necesita de un tipo especial de sensor que sea capaz de entender la información del agente y ejecutar los comandos que éste le plantee, por lo cual requiere un poco más de Hardware especializado que las redes de sensores tradicionales.

Zhou, et al [57], realizan una evaluación de un sistema multiagente para monitorización de salud estructural, detallando cada uno de los agentes, la arquitectura de los mismos, las propiedades de la estructura, la ubicación de los agentes en la misma y los tipos de interacción posibles entre los elementos de monitoreo. También se especifican los tipos de sensores y se muestran los resultados obtenidos, al realizar la monitorización sobre una placa de aluminio con la distribución seleccionada, sobre la cual se realizó una extracción de características dinámicas.

De acuerdo con Shi, et al [52], y con Zhao, et al [54], el uso de multiagentes inteligentes necesita una investigación más profunda en el área de la arquitectura adecuada, ya que las arquitecturas utilizadas han dado buenos resultados pero no se puede garantizar que entreguen los resultados más confiables acerca de las propiedades de la estructura, en poco tiempo. Tanto para la aeronáutica, según Shi, et al [52], como para los edificios, según Zhou, et al [57], es muy importante localizar fallas in situ, minimizando el peso necesario y maximizando la velocidad y confiabilidad por lo cual el trabajo de mejorar las técnicas de monitorización no está concluido y se requiere una mayor investigación sobre los problemas de velocidad, sincronización, confiabilidad y flexibilidad del uso de multiagentes.

### **3. CONCLUSIONES**

Tomando en cuenta que la implementación de los sistemas de monitorización ha presentado una tendencia hacia las implementaciones inalámbricas distribuidas, Zhao, et al [54], plantean que cada sensor debe comportarse como un agente inteligente único, diseñado exclusivamente para desempeñar sólo una función en el momento de ser requerido, minimizando así el consumo de potencia.

Un aporte importante al estado del arte es encontrar una arquitectura multiagente apropiada para la monitorización de salud estructural en cualquier tipo de estructura, ya que las arquitecturas multiagente implementadas están basadas en orden jerárquico con niveles de trabajo que funcionan adecuadamente en ciertas estructuras a escala, pero su efectividad no se ha comprobado en puentes o en vigas de gran tamaño.

Por lo anterior, se ha planteado el uso de una arquitectura multiagente que sea variable y flexible, tal como la arquitectura de control multicapas o la arquitectura basada en roles fijos, para la monitorización de salud estructural. A priori, esta aplicación sería viable debido a que existen similitudes entre los requerimientos del problema de monitorización de salud estructural y los que existen en problemas ya resueltos por las arquitecturas multiagentes como por ejemplo: la coordinación de nodos de red.

Algunos autores han realizado sus propias arquitecturas multiagente para monitorizar, pero las ontologías no han sido probadas en su totalidad, por lo cual pueden aparecer errores de comunicación y debates entre los agentes, que deben ser solucionarse para optimizar la velocidad de entrega de resultados.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Farrar, Charles R., Doebling, Scott (1997) "An Overview Of Modal Based Damage Identification Methods", Engineering Analysis Group, Los Alamos National Laboratory.
- [2] Rytter, A. (1993) "Vibration Based Inspection Of Civil Engineering Structures", Department Of Building Technology And Structural Engineering. De acuerdo con [1].
- [3] Shrive, N.G., (2005) "Intelligent Structural Health Monitoring: A Civil Engineering Perspective", IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Department Of Civil Engineering, University Of Calgary, p.1973 – 1977.
- [4] Avitable, Peter. "Experimental Modal Analysis (A Simple Non-Mathematical Presentation)", Modal Analysis and Control Laboratory, Sound and Vibration Magazine, University Of Massachusetts.
- [5] Yuan S.F., Lai X.S., Zhao X., Xu X., Zhang L., (2006) "Distributed Structural Health Monitoring System Based On Smart Wireless Sensor And Multi-Agent Technology", Smart Materials & Structures, p.1-8.
- [6] Weiss, Gerhard. (1999) "A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence", MIT Press.
- [7] Sohn Hoon., Farrar Charles R., Hemez Francois M., Shunk Devin D., Stinemates Daniel W., Nadler Brett R., (2004) "A Review Of Structural Health Monitoring Literature: 1996 – 2001", Los Alamos National Laboratory Report, p.1-311.
- [8] Zou Z.K., Noori M., St. Amanda R., (2000) "Wavelet-Based Approach For Structural Damage Detection", Journal Of Engineering Mechanics, p.677-683.

- [9] Bernal D., Gunes B., (2000) "Observer/Kalman And Subspace Identification Of The Ubc Benchmark Structural Model", Proceedings Of The 14th ASCE Engineer Mechanics Conference, de acuerdo con [13].
- [10] Medda Alessio., DeBrunner Victor., Mish Kyran., (2006) "Wavelet Based Structure Damage Detection", Fortieth Asilomar Conference On Signals, Systems And Computers, p.574-578.
- [11] Medda Alessio., Chicken Eric., DeBrunner Victor., (2007) "Sigma-Sampling Wavelet De-Noising For Structural Health Monitoring", IEEE/SP 14th Workshop on Statistical Signal Processing, p.119 – 122.
- [12] Tansel I.N., Chen P., Wang X., Yenilmez A., Ozcelik B., (2005) "Structural Health Monitoring Applications For Space Structures", Proceedings of 2nd International Conference on Recent Advances in Space Technologies, RAST.
- [13] Caicedo Juan Martin., (2003), "Structural Health Monitoring Of Flexible Civil Structures", Washington University, Department Of Civil Engineer Doctoral Thesis.
- [14] Juang J.N., Pappa R.S., (1985) "An Eigensystem Realization Algorithm For Modal Parameter Identification And Model Reduction" Journal Of Guidance And Control Dynamics, p.620 – 627, de acuerdo con [2].
- [15] Lew J.S., Juang J.N., Longman R.W., (1993) "Comparision Of Several System Identification Methods For Flexible Structures", Journal Of Sound And Vibration, p.461-480, de acuerdo con [2].
- [16] James G.H., Carne T.G., Lauffer J.P., (1996) "Modal Parameter Extraction Form Large Operating Structures Using Ambient Excitation", Proceedings Of The 14th International Model Analysis Conference.
- [17] Brownjhon J.M.W., (1997) "Vibration Characteristics of a Suspension Footbridge", Journal of Sound and Vibration, p.29-46, de acuerdo con [7].
- [18] Felber A., (1997) "Practical Aspects Of Testing Large Bridges For Structural Assessment", Structural Health Monitoring, Current Status And Perspectives, p.577-588, de acuerdo con [7].
- [19] Constanze Tschope., Matthias Wolff., (2007), "Automatic Decision Making In SHM Using Hidden Markov Models", 18th International Workshop On Database And Expert Systems Applications, IEEE Computer Society, p.307–311.
- [20] Rammohan Roshan., Reda Taha Mahmoud., (2005) "Exploratory Investigations For Intelligent Damage Prognosis Using Hidden Markov Models", IEEE International Conference On Systems, Man And Cybernetics, p.1524–1529.

- [21] Rodriguez Ramses y Barroso Luciana R., (2002) "Stiffness-Mass Ratios Method For Baseline Determination And Damage Assesment Of A Benchmark Structure" Proceedings Of The American Control Conference, p.2469 – 2474.
- [22] Barroso L.R., Rodriguez R., (2004) "Damage Detection Utilizing The Damage Index Method to A Benchmark Structure", Journal Of Engineering Mechanics, p.142-151.
- [23] Nguyen Minh., Wang Ziaoming., Su Zhongqing., Ye Lin., (2004) "Damage Identification For Composite Structures With A Bayesian Network", Intelligent Sensors, Sensor Networks And Information Processing Conference, p.307 – 311.
- [24] Kim Jina., Grisso Benajmin L., Ha Dong S., y Inman Daniel J., (2007) "An All-Digital Low-Power Structural Health Monitoring System", IEEE Conference on Technologies for Homeland Security, p.123-128.
- [25] Kundu Sujan., Roy Sodip., y Pal Ajit., (2008) "A Power Aware Wireless Sensor Network Based Bridge Monitoring System" 16th IEEE International Conference on Networks, ICON, p.1-7.
- [26] Allen William E., y Sundermeyer Jeffrey N., (2005) "A Structural Health Monitoring System For Earthmoving Machines" IEEE International Conference on Electro Information Technology, p.22-25.
- [27] Musani D., Lin K., Sismunic Rosing T., (2007) "Active Sensing Platform For Wireless Structural Health Monitoring", Proceedings of the 6th international conference on Information processing in sensor networks, p.390 – 399.
- [28] Bayissa Wirtu L., Haritos Nicholas., (2007) "Damage Identification In A Full-Scale Bridge Structure", disponible en [http://www.aees.org.au/Proceedings/2007\\_Papers/11\\_Bayissa,\\_Wirtu.pdf](http://www.aees.org.au/Proceedings/2007_Papers/11_Bayissa,_Wirtu.pdf) el 27 de junio de 2009.
- [29] Li Fangmin., Xiong Li., Liu Xinhua., Wu Xuehong., (2006) "Data Transfer Protocol In Bridge Structural Health Monitor System Using Wireless Sensor Network" Proceeding On The 6th World Congress On Intelligent Control And Automation, p.5102 – 5105.
- [30] Chen Bo., Wang Jinjiang., (2008) "Design of A Multi-modal and High Computation Power Wireless Sensor Node for Structural Health Monitoring", IEEE/ASME International Conference on Mechtronic and Embedded Systems and Applications, MESA, p.420 – 425.
- [31] Song, G., Gu, H., Mo, Y.L., "Smart Aggregates: A Distributed Intelligent Multi-Purpose Sensor Network (DIMSN) For Civil Structures", IEEE International Conference On Networking, Sensing And Control, Páginas 775 – 780, 2007.

- [32] Park, Chulsung, Xie, Quiang, Chou, Pai H., Shinozuka, Masanobu, “DuraNode: Wireless Networked Sensor For Structural Health Monitoring”, *Sensors*, Páginas 277 – 280, 2005.
- [33] N.F. Ince, Chu-Shu Kao, M. Kaveh, A. Tewfik, J.F. Labuz, “Averaged Acoustic Events For Accurate Damage Localization” ICASSP 2009, Páginas 2201 – 2204.
- [34] HU, Shan-Li, WU, Hai-Yan, “A Decision-Making Model for Intelligent Agent with Internal State” *Proceedings of the 28th Annual International Computer Software and Applications Conference (COMPSAC)*, IEEE Computer Society, 2004.
- [35] Jennings, N.R., Wooldridge, M., “Applications Of Intelligent Agents”, Queen Mary & West Field College, Universidad de Londres, 1998.
- [36] Russel, Stuart, Norvig, Peter, “Artificial Intelligence, A Modern Approach”, prentice hall, 1995.
- [37] Zhu, Haibin, “A Role-Based Architecture for Intelligent Agent Systems”, *Proceedings of the IEEE Workshop on Distributed Intelligent Systems: Collective Systems and Its Applications*, IEEE Computer Society, 2006.
- [38] Hassan Said, Syed Zahid, Abidi, S.S.R., Manikam, S., Yu-N, Cheah, “ADMI: A Multi-Agent Architecture To Autonomously Generate Data Mining Services” *2nd IEEE International Conference On Intelligent Systems*, Páginas 273 – 279, 2004.
- [39] Lander, Susan E., “Issues In Multiagent Design Systems” *A.I. in design*, IEEE Expert, Páginas 18 – 26, 1997.
- [40] Kong, Lianfang, Xiao, Lei, “A Multi- Layered Control Architecture of Intelligent Agent”, *IEEE International Conference on Control and Automation*, Páginas 1454 – 1458, 2007.
- [41] Bellifemime, Fabio, Caire Giovanni, Trucco, Tiziana, “JADE Programmer’s Guide”, (TILAB), 2007.
- [42] Yu, Han, Shen, Zhiqui, Miao, Chunyan, “Intelligent Software Agent Design Tool Using Goal Net Methodology” *IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology*, IEEE Computer Society, Páginas 43-46, 2007.
- [43] Padgham, L., Thangarajah, Jhon, Winikoff, M., “Tool Support For Agent Development Using The Prometheus Methodology” *Fifth International Conference On Quality Software*, 2005.



- [44] Horling, Bryan, Mailler, Roger, Lesser, Victor, "A Case Study of Organizational Effects in A Distributed Sensor Network" IEEE Computer Society, Proceedings of the IEEE/ WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology, 2004.
- [45] Rodin, Vincent, Nédélec, Alexis, "A Multiagent Architecture for Distributed Virtual Environments", IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Páginas: 955-960, 2000.
- [46] Otte, William R., Kinnebrew, John S., Schmidt, Douglas C., Biswas, Gautam, "A Flexible Infrastructure For Distributed Deployment In Adaptive Sensor Webs", Proceedings on the IEEE Aerospace Conference, Páginas: 1 – 12, 2009.
- [47] Gatani, Luca, Lo Re, Giuseppe, Ortolani, Marco, "Monitoring Wireless Sensor Networks Through Logical Deductive Processes", Military Communications Conference, Páginas 93-98, 2006.
- [48] Kazandzhiev, Aleksandar, Montchev, Ivan, Popova, Lozka, Shikalanov, Dimiter, "Distributed Multiagent Based Approaches", International Conference on Integration of Knowledge Intensive Multi-Agent Systems, KIMAS, 2005.
- [49] Ibarra M., Salvador, Quintero, Cristian G., De la Rosa, Josep Ll., Castán R., José A., "An Approach Based On New Coordination Mechanisms To Improve The Teamwork Of Cooperative Intelligent Agents", Seventh Mexican International Conference on Computer Science, IEEE Computer Society, 2006.
- [50] Fukuda, Toshio, Takagawa, Isao, Haseguawa, "From Intelligent Robot to Multiagent Robotic System", International Conference on Integration of Knowledge Intensive Multi-Agent Systems, KIMAS, Páginas 413-417, 2003.
- [51] Jacak, W., Pröll, K., Dreiseitl, S., "Conflict Management In An Intelligent Multiagent Robotic System", IEEE International Conference On Systems, Man And Cybernetics, Páginas 1793 – 1798, 2000.
- [52] Shi, Lihua, Zhao, Xia, Wu, Jian, Li, Gang, Qiu, Lei, "Recent Progress on Distributed Structural Health Monitoring Research at NUAA" Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Marzo 2008, Páginas: 373-386.
- [53] Hoschke, N., Lewis, C. J., Price, D. C., Scott, D. A., Edwards, G. C., Batten, A., "A Self-Organizing Sensing System For Structural Health Management" Knowledge-Based Intelligent Information And Engineering Systems, Proceedings, Lecture Notes In Artificial Intelligence, 2006, Páginas: 349-357.
- [54] Zhao, Xia, Yuan, Shenfang, Yu, Zhenhua, Ye, Weisong, Cao, Jun, "Designing Strategy for Multi-Agent System Based Large Structural Health Monitoring", Expert Systems with Applications, Páginas: 1154-1168, Febrero 2008.



- [55] Corkill, Daniel A., "Blackboard Systems" A.I. Expert, 1991.
- [56] Taylor, Stuart G., Farinholt, Kevin M., Flynn, Eric B., Figueiredo, Eloi, Mascarenas, David L., Moro, Erik A., Park, Gyuhae, Todd, Michael D., Farrar, Charles R., "A Mobile-Agent-Based Wireless Sensing Network For Structural Monitoring Applications" Measurement Science & Technology, Abril 2009.
- [57] Zhou, Hengbao, Sun, Hongbing, Qiu, Lei, "An Evaluation on the Multi-Agent System Based Structural Health Monitoring For Large Scale Structures", Expert Systems with Applications, 2008, Páginas: 4900-4914.