

Diseño e implementación de una red de sensores para la adquisición de variables relacionadas con la vigilancia estructural de puentes*

Design and Implementation of a Sensor Network to Gather Variables for the Structural Surveillance of Bridges**

Desenho e implementação de uma rede de sensores para a aquisição de variáveis relacionadas com a vigilância estrutural de pontes***

*David Magín Flórez-Rubio*****

*Camilo Otálora-Sánchez******

*Carlos Iván Páez-Rueda******

* Fecha de recepción: 16 de marzo de 2009. Fecha de aceptación para publicación: 3 de julio de 2009. Este artículo se deriva del proyecto de investigación denominado *Red inalámbrica de sensores*, financiado por la Pontificia Universidad Javeriana, con registro 000002.

** Submitted on March 16, 2009. Accepted on July 3, 2009. This article is derived from the research project called *Wireless Sensor Network*, financed by the Pontificia Universidad Javeriana, Registration 000002.

*** Data de recepção: 16 de março de 2009. Data de aceitação para publicação: 3 de julho de 2009. Este artigo deriva do projeto de pesquisa denominado *Rede sem-fio de sensores*, financiado pela Pontificia Universidade Javeriana, com número de registro 000002.

**** Ingeniero electrónico, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Maestría en Sistemas y Redes Informáticas Críticas, Universidad de Toulouse, Toulouse, Francia. Director General de Lemov E. U., Bogotá, Colombia. Correo electrónico: mflorez@lemov.net.

***** Ingeniero electrónico. Máster en Ingeniería Electrónica, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Profesor asistente del Departamento de Electrónica, Pontificia Universidad Javeriana. Correo electrónico: camilo.otalora@javeriana.edu.co

***** Ingeniero electrónico, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Máster en Ingeniería Eléctrica, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Profesor asistente del Departamento de Electrónica, Pontificia Universidad Javeriana. Correo electrónico: paez.carlos@javeriana.edu.co.

Resumen

En el presente artículo se presenta el diseño y la implementación de una red de sensores para la vigilancia estructural de puentes. La implementación fue comprobada en un piloto real en el viaducto César Gaviria Trujillo, en el Departamento de Risaralda, Colombia. Los resultados encontrados fueron exitosos, en términos de la solución integral y de la confiabilidad de la red.

Palabras clave

Redes de sensores, instrumentación electrónica, optimización estructural.

Abstract

This article details the design and implementation of a sensor network for structural surveillance of bridges. Such network was piloted at the César Gaviria Trujillo Viaduct in the department of Risaralda, Colombia. Results were successful in terms of solution and reliability of the network.

Key words

Sensor networks, electronic instrumentation, structural optimization.

Resumo

No presente artigo apresenta-se o desenho e a implementação de uma rede de sensores para a vigilância estrutural de pontes. A implementação foi comprovada em um piloto real no viaduto César Gaviria Trujillo, no departamento de Risaralda, Colômbia. Os resultados encontrados foram exitosos, em termos da solução integral e da confiabilidade da rede.

Palavras chave

Redes de sensores, instrumentação eletrônica, otimização estrutural.

Introducción

El último siglo se ha caracterizado por la implementación de los más sofisticados sistemas de telecomunicaciones, cuyo objeto principal ha sido satisfacer la demanda de la sociedad, de mantenernos informados en cualquier momento y en cualquier lugar. Desde la implementación de las redes de telecomunicaciones, como la telefónica alámbrica, inalámbrica o internet, el paradigma de las comunicaciones modernas ha cambiado la cultura y los hábitos del ser humano, y ha hecho indispensables este tipo de sistemas hasta convertirse en un indicador de desarrollo.

La tendencia tecnológica actual muestra que las redes, además de definirse a través de sus protocolos propietarios, están conformadas por redes de redes, con jerarquías definidas. Un ejemplo de esta situación es internet, que se conformó a partir de la interconexión de algunas redes tipo LAN hasta considerarse, hoy en día, como una red global conformada por millares de redes de todos tipos. En particular, un tipo de red denominada *red de sensores* se ha usado desde los inicios del siglo XX en aplicaciones comerciales y militares muy específicas.

Las primeras redes de sensores comerciales surgieron con las redes de radares para el control de tráfico aéreo y en la *grilla* de distribución de potencia nacional en Estados Unidos, donde una gran cantidad de sensores dispuestos espacialmente lejos, dotados de comunicación y de procesamiento, aportaban a la toma de decisiones complejas en este tipo de procesos. En las aplicaciones militares, Estados Unidos formó una red de sensores de tipo acuático para detectar y seguir submarinos soviéticos en la Guerra Fría.

De la misma forma, un tipo de red conformada por radares fue desarrollada para su defensa y para la detección de cargamentos de drogas aerotransportados. Este tipo de redes iniciales tenían la característica de tener arquitecturas jerárquicas, donde el ser humano tenía un papel preponderante en la toma de decisiones de la red (Chee-Yee y Kumar, 2003).

Una definición moderna de una red de sensores puede encontrarse en (Akyildiz y Xudong, 2005), donde los autores la definen como una red compuesta por una gran número de nodos sensores que están densamente localizados dentro o muy cercano al fenómeno. En general, la posición de cada sensor se desconoce, existen limitantes importantes de energía por nodo y, por ende, se tiene una baja confiabilidad por nodo. A diferencia de una red ad hoc, una red de sensores tiene características distintivas: la cantidad de nodos está constituida por varios órdenes de magnitud más grandes; los nodos se encuentran densamente localizados y son propensos a fallas; la topología de la red cambia frecuentemente, debido a la baja confiabilidad de cada nodo; la mayoría de los esquemas de comunicaciones en las redes de sensores están basadas en mensajes *broadcast*; cada nodo se encuentra limitado en potencia, facilidades de computación y memoria, y los esquemas de direccionamiento individual, como una dirección IP, no son factibles, debido a la sobrecarga que se produciría en la información transportada por la red.

Las aplicaciones actuales de las redes de sensores se encuentran en la seguridad de infraestructuras realizadas por el ser humano, donde se analizan o identifican las posibles amenazas; en el monitoreo del medio ambiente, donde se analizan los efectos climáticos o enfermedades en la vegetación o población de especies; en el sondeo industrial, donde se mejora el desempeño de las máquinas complejas, y en el control de tráfico, donde los sensores ayudan a vigilar el flujo de vehículos en las vías (Chee-Yee y Kumar, 2003).

En el presente artículo se detallan los aspectos de diseño e implementación de una plataforma de *hardware* y *software* consecuente con los requerimientos específicos de una aplicación de vigilancia estructural de puentes utilizando una red de sensores. En la primera parte se presenta el diseño de un nodo sensor y de la red de telecomunicaciones requerida para darle una solución integral al problema planteado. En la segunda parte se describen los resultados obtenidos al implementar la red. En la última parte se presentan las conclusiones y prospectiva de la investigación realizada.

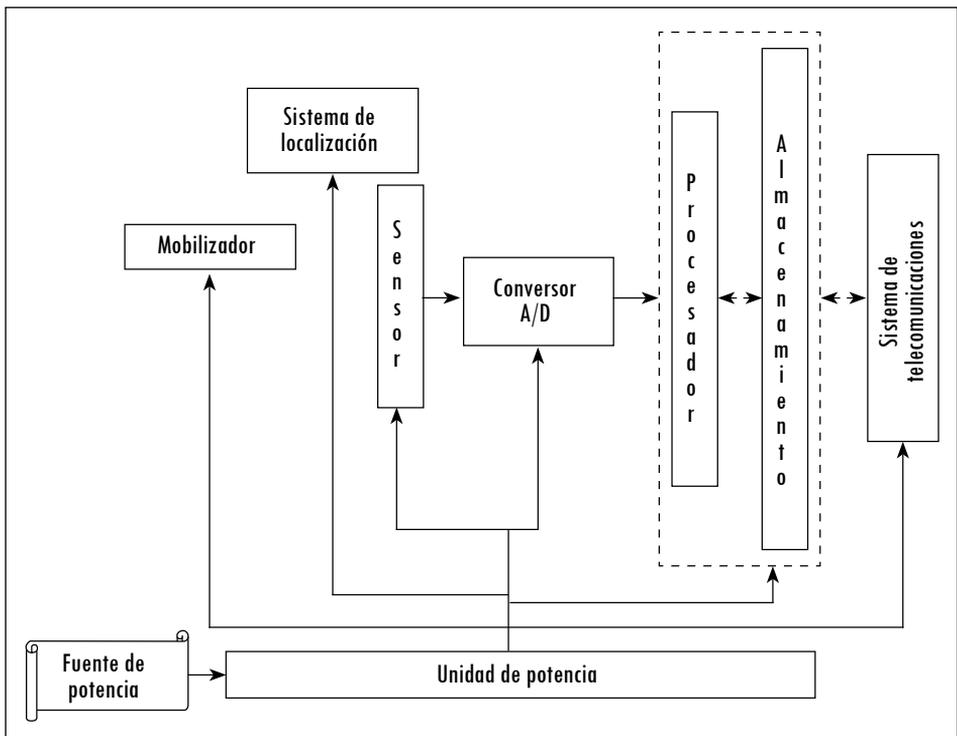
1. Diseño

1.1 Diseño del nodo sensor

En general, el diagrama en bloques de un nodo sensor puede esquematizarse por medio de la Figura 1 (Akyildiz *et al.*, 2002). La unidad de potencia se encarga de transformar la energía suministrada por la fuente de potencia a los valores requeridos, mediante los componentes eléctricos de los cuales está compuesto el

nodo sensor. La unidad de sensores se encarga de adquirir las señales mecánicas y acondicionar las señales eléctricas; entre tanto, la unidad analógica/digital (A/D), de convertir las señales típicamente analógicas en discretas, para su posterior procesamiento y almacenamiento en la unidad de procesamiento; el sistema de comunicaciones, de habilitar la conexión a la red de telecomunicaciones por parte del nodo sensor, y, por último, el sistema de localización permite darle capacidades de referenciación (sea fija o relativa en la red) y el movilizador podría dotar al nodo sensor de actuadores que cambian su posición.

Figura 1. Diagrama en bloques general de un nodo sensor



Fuente: presentación propia de los autores.

En consideración con la aplicación propuesta, la unidad de sensores diseñada e implementada se dividió en dos partes: una típica del fenómeno que se va a evaluar y los cuales fueron realizados con sensores del tipo *Lineal Differential Transformer* (LVDT), para medir microdesplazamiento; sensores de tipo *strain-gages*, para medir deformación, y acelerómetros piezoeléctricos, para medir la

vibración. La otra parte corresponde a la detección de variables propias de cada nodo, como son la temperatura, la aceleración en los tres ejes, el campo magnético en dos ejes, la corriente por la batería y la corriente por el panel solar.

Estas últimas medidas internas del nodo se utilizaron para determinar su estado, supervivencia y localización. La aceleración estática en los tres ejes permite ubicar el nodo en la vertical, y la medida del campo magnético, ubicar el nodo respecto al norte magnético. Las otras variables aportaron información sobre el estado de la fuente de potencia y de la unidad de potencia.

La fuente de potencia utilizada en la aplicación realizada fue la solar, obtenida a través de paneles solares. Para incrementar la supervivencia de la red, se usaron como respaldo baterías de tipo níquel-cadmio (NiCd) de 700 mAh por nodo, con un sistema diseñado para su recarga automática. El procesador escogido fue el DSPIC30F4013 de Microchip, el cual tiene un buen desempeño, con bajo consumo de potencia, un convertor incorporado A/D de 12 bits con adquisición a 200 K muestras por segundo, almacenamiento de 12 medidas sin requerir atención por parte del procesador y múltiples fuentes de reloj para minimizar su consumo.

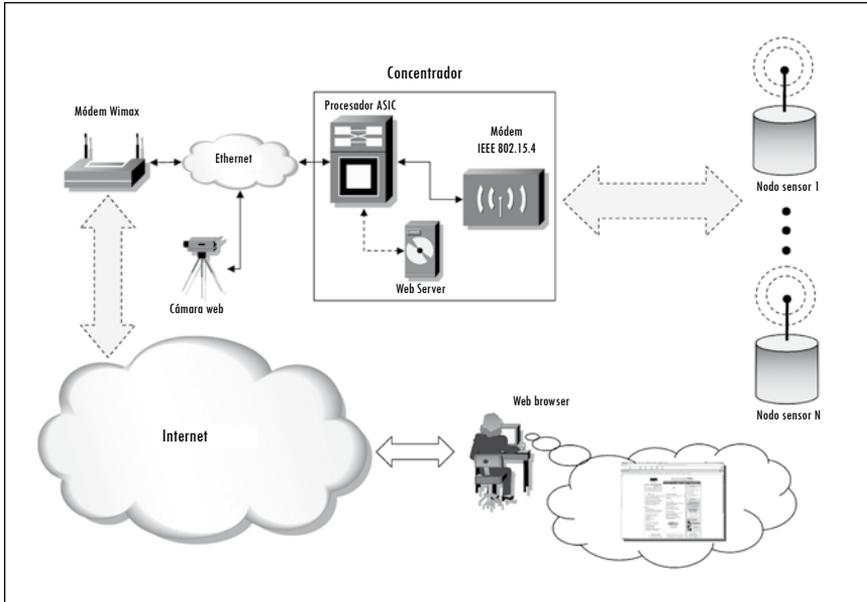
Finalmente, como módulo de comunicaciones se utilizó el *transceiver* XBee PRO, de Max Stream, el cual utiliza el protocolo de red IEEE 802.15.4 para comunicaciones punto a punto o punto multipunto. Este *transceiver* es de bajo costo, tiene una capacidad de transmisión de datos a máximo 250 kbps y encriptación AES 128 y opera en la banda IS 2,4 GHz y en los rangos industriales de temperatura (-40 a 85 °C). El *transceiver* fue seleccionado, entre otras cosas, dado que el estándar 802.15.4 es la base del estándar dominante de redes de sensores (ZigBee) y que dicho *transceiver* contiene amplificadores de potencia para una cobertura de cientos de metros en línea de vista.

1.2 Diseño de la red

Con el fin de dotar de comunicaciones con internet a la red de sensores, se implementó la arquitectura de red propuesta en la Figura 2. Los nodos sensores se comunican vía la capa física del protocolo 802.15.4 a un concentrador. Este dispositivo recopila, empaqueta, transmite y recibe la información de los nodos sensores hacia un módem WiMAX, mediante el protocolo Ethernet. La comunicación entre el módem WiMAX e internet es garantizada por un proveedor de servicios nacional en Colombia. Además, como elemento fundamental del concentrador, se utilizó una tarjeta de desarrollo RC3720 del fabricante Z-World, junto con las herramientas de compilación Dynamic C y los módulos Rabbit-Web, para facilitar el desarrollo de aplicaciones embebidas con interfaz web.

Con estas herramientas, el concentrador fue programado y configurado como un servidor web y con un *socket* TCP/IP, de tipo servidor, a la espera clientes. Tal servidor web permite acceder a través de internet, con un *web browser*, a los datos del dispositivo concentrador. El aplicativo se encuentra protegido por nombre de usuario y contraseña, a fin de dotar de seguridad al sistema.

Figura 2. Diagrama esquemático de la red propuesta



Fuente: presentación propia de los autores.

Al tener comunicación con el módem WiMAX vía Ethernet, fue posible integrar otros tipos de dispositivos en la solución final, como fue la instalación de dos cámaras con servidor TCP/IP incluido, con el objeto de supervisar y visualizar los puentes, vía remota y autónoma. De forma complementaria, se diseñó e implementó un *software* de monitoreo, el cual permite adquirir y visualizar los datos y las configuraciones de los nodos. Este *software* fue desarrollado en Java e implementa los elementos de la capa de aplicación requerida por el usuario final. Este programa despliega gráficas de esfuerzo contra tiempo y dos ventanas con el video panorámico del puente en análisis. Para acceder a esta página de administración es necesario que el cliente introduzca un nombre de usuario y una contraseña válidos. Una vez se haya accedido a la página de administración, es posible también tener acceso a los parámetros de configuración de los nodos.

2. Resultados

2.1 *Nodo sensor*

En la Figura 3a se observa la implementación final de las partes constitutivas del nodo sensor diseñado, donde la primera tarjeta, de izquierda a derecha, tiene la funcionalidad de la detección. Posteriormente, está la tarjeta que tiene las funcionalidades de procesador, almacenamiento y unidad de potencia. La última tarjeta tiene la funcionalidad de comunicaciones.

Figura 3. Nodo sensor desarrollado. (a) Partes constitutivas del nodo. (b) Nodo totalmente ensamblado



Fuente: presentación propia de los autores.

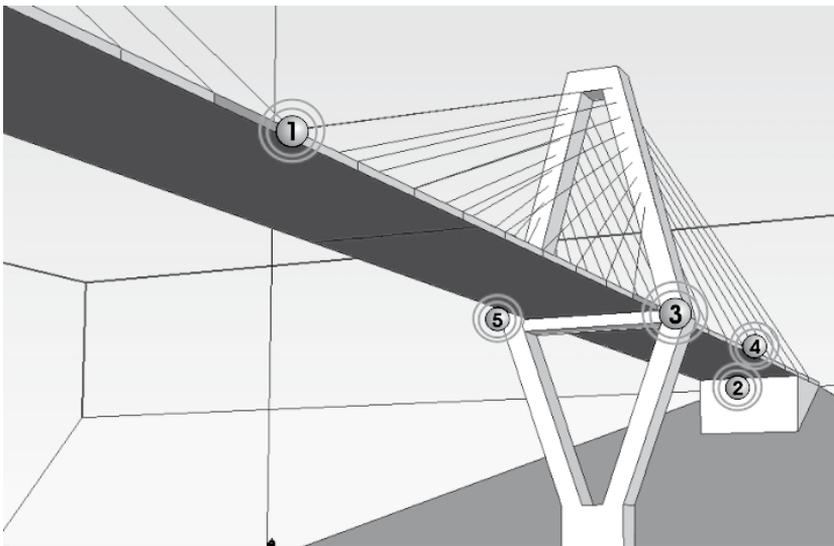
Adicionalmente, en la Figura 3a se detalla el encapsulado metálico que se diseñó para el aislamiento atmosférico y electromagnético, unas baterías de baja capacidad para propósitos de mayor portabilidad y la antena de radiación monopolo utilizada. En la Figura 3b se observa el nodo sensor ya ensamblado, de forma escalable vertical, donde para una referencia y comparación espacial con otras tecnologías se detalla que las dimensiones del encapsulado cilíndrico son: diámetro de 7,2 cm y largo de 7,5 cm.

En cuanto a la confiabilidad de cada nodo sensor, se encontró que, debido a condiciones atmosféricas de la zona donde se realizaron las mediciones, la fuente de potencia no alcanzó a cargar totalmente las baterías del nodo sensor; por ello no se logró una total independencia nocturna en el funcionamiento de la red. Aun con lo anterior, se desarrollaron unas funciones de recuperación de cada nodo sensor, con el objeto de retomar su comunicación con la red a lo largo del día. No se encontró durante el período de funcionamiento de la red un caso catastrófico que no permitiera que un nodo sensor se recuperara de una falla.

2.2 Red de sensores

La red completa esquematizada en la Figura 2 fue implementada como piloto en la vigilancia estructural del viaducto César Gaviria Trujillo, un puente colgante que une a la ciudad de Pereira con el municipio de Dosquebradas, en el Departamento de Risaralda, Colombia. El diagrama esquemático de dicho viaducto se ilustra en la Figura 4 y tiene una longitud, en su tramo principal, de 211 m y un ancho del tablero de 24 m.

Figura 4. Diagrama esquemático del viaducto César Gaviria Trujillo y la posición de los sensores en dicho puente



Fuente: presentación propia de los autores.

Los resultados de la implementación propuesta fueron exitosos. Se logró comunicación y reporte con cada nodo sensor localizado hasta a una distancia de un km, aunque la red de sensores fue simple, ya que se usó una configuración lógica en estrella para su comunicación con cinco nodos distribuidos como se ilustra en la Figura 4. Los limitantes de la cantidad de nodos puestos para la instrumentación del puente fueron dados por la inversión requerida en cada etapa de sensado, mas no por los limitantes de la topología propuesta.

Aun con lo anterior, la implementación de toda la red de comunicaciones fue especialmente difícil, considerando el compromiso de tiempo de desarrollo, el tiempo de operación y la complejidad de la solución. La autonomía y super-

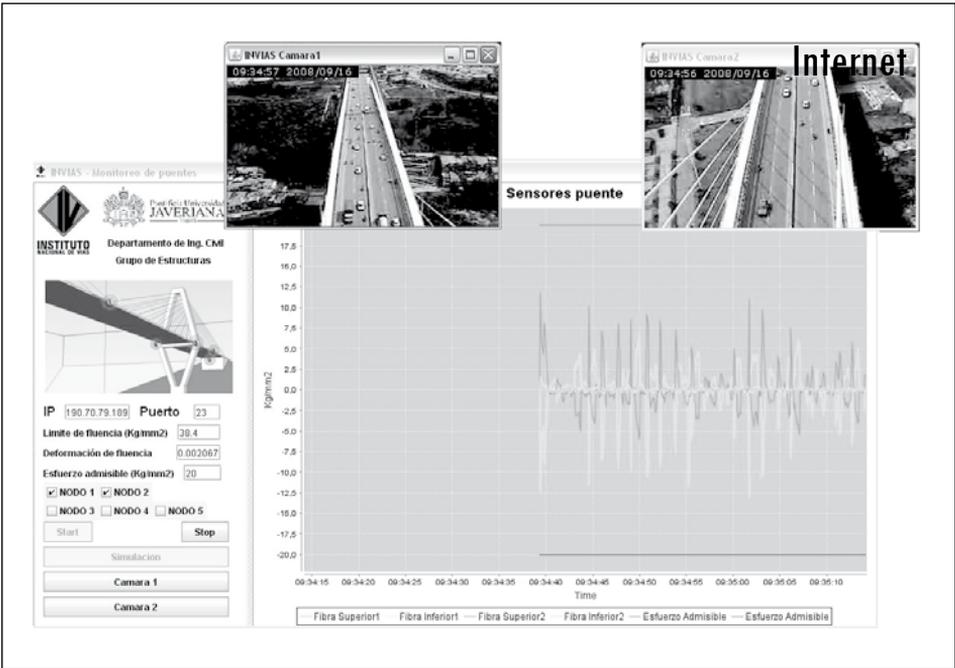
vivencia de la red implementada fue evaluada durante dos meses consecutivos, con resultados exitosos, excepto por la independencia total en el horario nocturno.

En cuanto a la cantidad de sensores con que fue instrumentado el puente, fue suficiente para una vigilancia y caracterización simplificada de la estructura. No obstante, la plataforma de *software* y *hardware* desarrollada es escalable para contener decenas de este tipo de sensores, con el objeto de realizar una evaluación mucho más compleja de la estructura.

2.3 Datos del fenómeno

Los datos adquiridos por medio de la red de sensores diseñada e implementada le permiten al grupo de investigación de Estructuras, de la Pontificia Universidad Javeriana, analizar estructuralmente el puente piloto. Un ejemplo de la plataforma de *software* desarrollada se ilustra en la Figura 5, donde se visualizan los datos de las cámaras instaladas y algunos de los datos de los sensores instalados con respecto a la escala de tiempo.

Figura 5. Ejemplo de la plataforma de *software* desarrollada



Fuente: presentación propia de los autores.

3. Conclusiones y trabajos futuros

En el presente artículo se presentó el diseño y la implementación de una red de sensores, con propósitos de vigilancia estructural de puentes. El piloto desarrollado fue exitoso y la red completa da vastas posibilidades de aplicación en diversos campos de acción, tanto por sus capacidades remotas de reporte de datos de forma inalámbrica como por la integración con la red internet.

Esta ventaja competitiva le permitirá al grupo de investigación en telecomunicaciones SISCOM, del Departamento de Electrónica de la misma Universidad, comenzar a evaluar diversos algoritmos propios de una red de sensores relacionados con la capa dos y tres del modelo de referencia OSI, con el objeto de lograr una mayor independencia nocturna, al lograr esquemas de enrutamiento eficientes, en términos de energía. También se pretende implementar y evaluar diversos algoritmos de enrutamiento basados en estrategias de posición relativa, con el objeto incrementar la independencia de la red a estos parámetros propios de la red.

Agradecimientos

Los autores agradecen los invaluable aportes del grupo de investigación en Estructuras y del laboratorio del Departamento de Electrónica, de la Pontificia Universidad Javeriana.

Referencias

- AKYILDIZ, I. F. y XUDONG, W. A survey on wireless mesh networks. *Communications Magazine, IEEE*. 2005, vol. 43, núm. 9, pp. S23-S30.
- AKYILDIZ, I. F.; SU, W.; SANKARASUBRAMANIAM, Y. y CAYIRCI, E. A survey on sensor networks. *Communications Magazine, IEEE*. 2002, vol. 40, núm. 8, pp. 102-114.
- CHEE-YEE, C. y KUMAR, S. P. Sensor networks: evolution, opportunities, and challenges. *Proceedings of the IEEE*. 2003, vol. 91, núm. 8, pp. 1247-1256.
- NICULESCU, D. Communication paradigms for sensor networks. *Communications Magazine, IEEE*. 2005, vol. 43, núm. 3, pp. 116-122.

