



CONAMA10
CONGRESO NACIONAL
DEL MEDIO AMBIENTE

COMUNICACIÓN TÉCNICA

Redes de Sensores sin Cables para Predicción de Eutrofización en Embalses y Lagos

Autor: Lucía López González

Institución: Fundación Instituto Tecnológico de Galicia

e-mail: lgonzalez@itg.es

Otros Autores: Analía López Fidalgo ¹; Jorge Seoane Brandariz ¹; Agustín P. Monteoliva Herreras ², Àlex Monná ², Pedro Arnau del Amo ³, Jordi Jiménez del Hierro ³ 1. Fundación Instituto Tecnológico de Galicia, POCOMACO, SECTOR I, PORTAL 5. 15190 A Coruña (SPAIN) 2. Ecohydros S.L. Polígono Industrial de Cros, Edificio 5- Nave 8, 39600- Maliaño, (SPAIN) 3. Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE), C/Gran Capitá, S/N, Campus Nord Upc, Ed.C1, 08034 Barcelona (SPAIN)

Abstract

Over 60% of the reservoirs in Spain are in a eutrophic state. Eutrophication is a process of nutrient enrichment by which surface waters (coastal, estuaries, rivers, lakes or reservoirs) suffer, beside other multiple effects, a decrease in the level of dissolved oxygen and a higher risk of harmful algae blooming, causing a degradation of the ecosystem, with further negative effects on health and environmental issues.

In recent years, implementation of digital systems to multisensory mobile platforms has been undergoing a technological revolution. It provides a competitive response to the growing demand for acquisition, processing and remote control monitoring systems in the aquatic environment. This article introduces the architecture of a wireless sensor network for real-time monitoring of key parameters that influence in the eutrophication process of reservoirs.

Key words: *Eutrophication, Reservoirs, Wireless Sensor Networks, Real time monitoring system, Water Ecological State*

Resumen

Más del 60% de los embalses en España se encuentran en un estado eutrófico. La eutrofización es un proceso de enriquecimiento de nutrientes por el cual, las aguas superficiales (costas, estuarios, ríos, lagos o embalses) sufren, entre otros múltiples efectos, un empobrecimiento en los niveles de oxígeno disuelto y un aumento del riesgo de proliferación de algas dañinas, causando la degradación del ecosistema, con además efectos negativos en la salud y el medioambiente.

En los últimos años, la implementación de sistemas digitales en plataformas móviles multisensoriales está atravesando una revolución tecnológica, aumentando los requerimientos de adquisición, procesado y monitorización remota de estos sistemas en medios acuáticos. Este artículo presenta la arquitectura de una red de sensores sin cables para la monitorización en tiempo real de parámetros fundamentales que influyen en el proceso de eutrofización de embalses.

Palabras clave: *Eutrofización, Embalses, Redes de Sensores sin Cables, Sistemas de Monitorización en Tiempo Real, Estado Ecológico del Agua*

1. Introducción

Más del 60% de los embalses en España se encuentran en un estado eutrófico. La eutrofización es un proceso mediante el cual el agua de ríos, lagos o embalses sufre una disminución del nivel de oxígeno disuelto, debido a la putrefacción de un exceso de nutrientes, provocando esto la destrucción del ecosistema, con efectos además negativos para la salud y el medioambiente y un gran impacto socioeconómico en general.

La población de embalses españoles de cierta entidad (inventario de embalses.net del Ministerio de Medio Ambiente) es de 359, que suman una capacidad de 53.905 hm³. Si a esos embalses se suman numerosas masas de agua retenidas (otras presas menores y azudes), y algunos estuarios, se podría estimar el total de masas de agua retenidas en España que potencialmente pueden sufrir eutrofización en unas 600.

Para tener una visión en el ámbito se puede considerar el número de los principales embalses y lagos europeos registrados en la base de datos "WISE" de la EEA (European Environmental Agency), un total de 2.227, de los que los 359 antes citados, serían españoles.

Las exigencias en cuanto a la conservación de ecosistemas acuáticos han sufrido un desarrollo muy importante, especialmente en lo que se refiere a la gestión integrada del agua, que exige alimentar modelos dinámicos complejos. En particular, la Directiva Marco de Aguas (DMA) ha supuesto un notable impulso en este sentido, que se refleja en la nueva contratación de servicios para el control avanzado del **estado ecológico de las aguas** y que viene a impulsar un mercado cada vez más dependiente de la disponibilidad de adaptaciones tecnológicas específicas.

En este sentido las crecientes exigencias normativas y sociales en materia medioambiental están induciendo un notable incremento en la demanda de información, tanto en lo que se refiere a la resolución espacio-temporal como a la temática. Los principales componentes de este escenario son:

- Los órganos de gestión ambiental: necesitan registrar de forma sistemática datos referentes a las condiciones físicas, químicas y biológicas (actualmente el coste es elevado).
- Creciente escasez, e incluso agotamiento, de los recursos naturales asociados al agua, tanto en sistemas marinos y de transición (rías y estuarios), como continentales (ríos, lagos, embalses).

En los últimos años, se está asistiendo a una auténtica revolución tecnológica en la aplicación de sistemas digitales a plataformas portátiles multisensoriales, capaces de adquirir datos ambientales a una tasa y fiabilidad muy elevada. La portabilidad y prestaciones conseguidas permite dar una respuesta competitiva a la demanda creciente de sistemas de adquisición, procesado y control remoto de información ambiental en el medio acuático.

Existe un reto tecnológico relacionado con la integración de sensores acústicos, ópticos y electrométricos, las plataformas de comunicaciones y gestión remota, y el desarrollo de

software o aplicaciones, en adaptaciones específicas relacionadas con todas esas variables. La actual dependencia en este tipo de productos de países productores de tecnología, especialmente EEUU y Japón, encarece y limita la disponibilidad de estos equipos, hasta el punto de que inhibe el crecimiento de ese mercado en España y otros países de nuestro entorno.

En este escenario es imprescindible el desarrollo de herramientas fiables que permitan medir *in situ* y en tiempo real parámetros de calidad del agua relacionados con la eutrofización en embalses, proporcionando un ahorro importante en costes de análisis de laboratorio, y tiempo de los muestreos, así como mejora radical en los procesos de gestión relativos a la calidad del agua en los embalses y otras masas de agua con respecto a los actuales sistemas y herramientas de detección y control.

El proyecto ROEM “Red de Observación de parámetros medioambientales para el estudio de la Eutrofización en eMbalses” (financiado por el plan Avanza I+D, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, convocatoria 2009) comprende la creación de un sistema distribuido de captación de información ambiental que permita la monitorización en tiempo real de los principales parámetros que influyen en la eutrofización de embalses. Este sistema está basado en redes de sensores sin cables para la captación y envío de la información, arquitecturas WEB, para la conexión a repositorios externos y generación de contenidos digitales para gestión medioambiental, y sistemas GIS (*Geographic Information System*) avanzados para el tratamiento de la información, integración con datos geográficos y visualización a través de Internet.

La plataforma tecnológica WEB permite el análisis de la representatividad de datos geofísicos, meteorológicos y medioambientales dentro de una red de observación sistemática de la ecología en embalses con especial atención a la difusión de alertas medioambientales. La información recogida puede ser almacenada para su uso en proyectos de gestión medioambiental y en estudios de simulación de la dinámica poblacional de las cianofíceas (algas verdes-azuladas o cianobacterias), un tipo de microalgas que pueden resultar tóxicas y que proliferan en aguas eutrofizadas. Además de afectar a la flora y fauna, las toxinas de algunas cianobacterias suponen también un riesgo para las personas. El contacto físico, la ingestión oral o la inhalación de estas algas puede ser neurotóxico y causar daños hepáticos y renales, e irritaciones de la piel y conjuntivitis.

Los usuarios inmediatos de este sistema son las entidades privadas y/o públicas encargadas de la gestión de los embalses y recursos hídricos en general. A nivel político las autoridades competentes encargadas de la gestión de los recursos hídricos podrán emplear la información para evitar y reaccionar a tiempo ante situaciones de alerta debidas a eventuales eutrofizaciones de embalses que pueden ocasionar un riesgo potencial para la salud de posibles usuarios.

Las sociedades de abastecimiento de aguas necesitan un control en tiempo cuasi-real de la calidad del agua que llega a los consumidores a través de la red de distribución, y las desaladoras además de esto requieren un control de las salmueras y de sus efectos en el medio marino receptor.

Las Confederaciones Hidrográficas y **agencias regionales de gestión de recursos hídricos**, que tal y como indica la DMA, están obligadas a llevar un control del estado ecológico en ríos, lagos y embalses, además de aplicar las medidas correctoras necesarias para mejorar su estado ecológico. Por otro lado, entre sus competencias está el control de la cantidad de las aguas y la planificación hidrológica, funciones que recaen en diferentes departamentos o unidades de gestión (Comisaría de Aguas, Oficina Técnica, Oficina de Planificación Hidrológica, Consejería de Medio Ambiente, Caza y Pesca, etc.).

Este artículo presenta la arquitectura de redes de sensores diseñada para el proyecto ROEM, en cuanto a tipología de nodos sensores, topología de red y encaminamiento de la información. La línea fundamental de investigación y desarrollo técnico de la red de sensores se centra en el empleo de tecnologías de sensores sin hilos WSN (*Wireless Sensing Networks / estándar IEEE 802.15.4*) para el diseño de un sistema distribuido de captación de información de diversos parámetros relacionados con la eutrofización en embalses.

2. Estado del arte

En lo que se refiere a los procedimientos de control biológico de la calidad de las aguas, se vienen aplicando métodos directos, basados en la toma de muestras y análisis de laboratorio. Los programas de control de la Directiva Marco del Agua suponen inversiones de gran calado en la adquisición de este tipo de datos, que se muestran claramente insuficientes a la hora de detectar y explicar fenómenos de gran impacto ambiental y social (proliferaciones de algas potencialmente tóxicas, mortandades masivas de peces, desaparición de especies de interés en conservación, proliferación de especies invasoras exóticas, etc). La necesidad de adoptar procedimientos de refuerzo en la adquisición de este tipo de información es acuciante y reconocida por los gestores del agua, y de hecho se está viviendo la antesala de una verdadera revolución en este campo, que debe permitir un notable incremento en el rendimiento de los programas de control biológico, especialmente en masas de agua no vadeables, como los embalses.

➤ **El sistema ROEM en su conjunto aporta un salto cualitativo en las posibilidades de controlar la calidad de las aguas de los embalses, y se inserta en una tendencia muy acentuada ya en otros ambientes (especialmente marinos). Importando la terminología al uso en los grupos de trabajo de plataformas sensoriales autónomas para el medio ambiente (Dickey et al., 2008) [1], gracias a este tipo de iniciativas tecnológicas multidisciplinares, el “siglo del inframuestreo” puede caer pronto en el olvido.**

Metodologías actuales y avanzadas en la detección e identificación de blooms de cianobacterias y sus toxinas

La identificación de los organismos causantes de blooms tóxicos, es con frecuencia el mejor modo de monitorizar una zona susceptible de sufrir dichas proliferaciones. Los estudios en este campo, han estado orientados a la identificación de las especies por microscopía, apoyados con la valoración de la toxicidad mediante bioensayos. Estos métodos son bastante intensivos y lentos, por lo que se están dedicando muchos esfuerzos en el desarrollo de metodologías automatizadas.

Ante la sospecha de un bloom de cianobacterias, actualmente se aplican diferentes procedimientos de laboratorio que comprenderían (a) un muestreo periódico, (b) análisis microscópico con identificación, (c) un recuento de colonias de cianobacterias, (d) un ensayo de toxicidad aguda por exposición intraperitoneal en ratón, (e) según sintomatología, confirmación de presencia de hepatotoxinas o neurotoxinas mediante HPLC-DAD y otras técnicas accesorias como el ensayo de la fosfatasa o ELISA.

En caso de determinarse la presencia de un bloom tóxico, se deberían desplegar un conjunto de medidas para evitar el acceso de personas y animales, así como limitar los usos del agua. Finalmente, resultaría fundamental favorecer la investigación, el desarrollo y la innovación de técnicas de detección, cuantificación y eliminación de toxinas y cianobacterias, sistemas de predicción de riesgos, e incorporar sistemas de vigilancia y control de la presencia de cianobacterias y sus toxinas, al menos en las redes de suministro de agua potable, especialmente en las épocas más calurosas del año.

El desarrollo del sistema de monitorización y alerta propuesto por ROEM contribuirá a facilitar enormemente las tareas de detección de estas proliferaciones.

La detección se basa en el uso de fluorímetros in situ de muy altas prestaciones, que miden la reemisión de luz a 680nm de pigmentos particulares de este tipo de algas cuando son excitados a longitudes de onda específicas. Este tipo de sensores ópticos tienen una función de autocorrección con la pérdida de luz por envejecimiento de las lámparas (LEDs) y un circuito que protege de la interferencia de la luz natural en aguas someras. Además, se someten a un proceso de calibrado que incluye tanto concentrados de pigmentos como cultivos de microalgas en diferentes diluciones.

Se usan dos fluorímetros, uno para detectar la clorofila a y otro para las ficocianinas, y sus valores se contrastan con una escala de riesgo de toxicidad construida a partir de información empírica y de la opinión de expertos en la materia.

Sobre la investigación en redes de sensores y su aplicación en el medioambiente

La tecnología de redes sensoriales sin cable WSN y las posibilidades de investigación y desarrollo en este campo emergente tienen su origen a principios de la década en curso en el campo de la ingeniería informática y de comunicaciones, con dos polos originales de singular importancia como son la EECS (Departamento de ingeniería eléctrica y ciencia de la computación) de la universidad de California en Berkeley y el CENS (Center of Embedded Networked Sensing), centro nacional de investigación de la National Science Foundation de los EEUU sobre redes sensoriales sin cable, situado en la universidad de California en Los Angeles. Destacan en particular las figuras del Dr. David Culler (UC Berkeley) y de la Dr. Deborah Estrin (UCLA). Referencias sobre la actividad de ambas instituciones en este campo pueden consultarse respectivamente en <http://research.cens.ucla.edu/>, y en <http://www.eecs.berkeley.edu/>.

Hoy en día las redes de sensores inalámbricas son una de las tecnologías emergentes con mayor actividad e impacto en aplicaciones de todo tipo. Existen ya aplicaciones médicas, militares, agrícolas, aeronáuticas, industriales, etc. Sin embargo, existen diversos problemas asociados a las redes de sensores, que hacen que sea *una de las líneas más interesantes de investigación en el campo de la ingeniería electrónica y de control*.

Los retos tecnológicos a cubrir en este campo incluyen el desarrollo de dispositivos de baja potencia, desarrollo de comunicaciones seguras (por ejemplo modulaciones robustas, protocolos seguros), inclusión de capacidades de localización y posicionamiento, desarrollo de inteligencia distribuida, desarrollos de algoritmos de enrutamiento multisalto eficientes, etc. Todas estas características, desarrolladas plenamente e integradas en un solo dispositivo abrirán un enorme mercado con múltiples aplicaciones como en entornos domóticos, monitorización medioambiental, control de procesos industriales y monitorización de explotaciones agrarias, gestión de stocks, seguridad, etc.

Aplicación de las WSN al medioambiente

Los campos de aplicación de las redes WSN son muy variados, en el campo industrial, ambiental, de seguridad, y de la monitorización del mundo construido, hábitat (edificación) e instalaciones (puentes, túneles y otras obras públicas).

En el ámbito específico de la aplicación de las redes sensoriales WSN a la monitorización del medio ambiente para el estudio y la predicción de parámetros, cabe mencionar las siguientes experiencias:

- Proyecto piloto (**EOFS**): es una observación medioambiental modelo para el Río de Columbia. Integra a una red de sensor de tiempo real, un sistema de dirección de datos y modelos numéricos avanzados. En particular (EOFS), está dirigido a problemas que combinan el hábitat de salmón y otros peces, mejoras de la navegación y restauración del hábitat.
- El Centro Envisense organiza la investigación y el desarrollo de proyectos que aplica las tecnologías de la informática penetrantes en el medioambiente. Uno de los proyectos que más destacan es el de **GLACSWEB** que recientemente consta publicado en el IEEE; dirigido por Dr. Kirk Martínez de la Escuela de Electrónica e informática, en asociación con el Dr. Jane Hart de la Universidad de la Escuela de Geografía. GLACSWEB está supervisando el movimiento del sedimento en el Glaciar de Briksdalsbreen, en Noruega, usando una serie de sondas inalámbricas insertada profundamente en el hielo.
- **Proyecto LIMNOPOLAR** – experiencia piloto en la Península Byers, situada en el extremo oeste de la Isla Livingston (Islas Shetland del Sur, Antártida), mediante una infraestructura de carácter no permanente, dependiente logísticamente de la Base Antártica Española Juan Carlos I. Su objetivo principal es la instalación de un sistema autónomo de muestreo de agua y registro de variables limnológicas en el lago que lleva el nombre del proyecto cuyo objetivo principal es investigar la sensibilidad y la respuesta de los ecosistemas acuáticos antárticos no marinos ante el cambio climático.
- **Sensores Remotos en los lagos Tibetanos** – Se analizaron los cambios en cinco lagos del área en las últimas dos décadas, y se comprobó que el nivel de sus aguas se elevó 12,6 metros, inundando unos 40,8 kilómetros cuadrados de pasto, cultivos y carreteras. El objetivo fue estudiar la respuesta del Tíbet al calentamiento global, lo que además servirá para proporcionar información de primera mano para los científicos mundiales que estudian los cambios climáticos.
- El centro de investigación de redes que mide la población de pájaros y otras especies (**UCLA's**).
- **Sensores Web en desiertos** - El paso lógico siguiente para un ambiente de redes de sensores es expandir el monitoreo de más localizaciones remotas u hostiles. Centros

de investigación mantienen sensores Web en los desiertos de nuevo México y la Antártica, y planea el uso de sensores inteligentes en Europa en ambas lunas de Júpiter y Marte.

- **Aunque sobre la temática del proyecto ROEM existen algunas referencias internacionales de interés, no existe sin embargo constancia de ninguna iniciativa equivalente en España hasta la fecha, razón por la cual este proyecto se puede considerar pionero en la aplicación de la tecnología WSN a la problemática de la eutrofización en embalses.**

3. Análisis de Parámetros

Un sistema para estudio de eutrofización puede contener diversidad de configuraciones en cuanto a la composición sensorial de cada nodo, en función de los parámetros que se requieren para los siguientes propósitos:

- a) Detectar el nivel de cianobacterias mediante fluorímetros especiales (ya descritos), y activar el sistema de alerta,
- b) Simular la dinámica de las cianobacterias en el sistema, monitorizando en el embalse las variables ambientales que la controlan, mediante una amplia gama de sensores ópticos y electroquímicos.
- c) Monitorizar los flujos de agua y nutrientes al embalse mediante nodos de control en los principales ríos afluentes (tributarios).

Una monitorización completa requiere la siguiente arquitectura en cuanto a tipo de nodo y parámetros:

- **PRINCIPAL**, ubicado en el propio embalse. Este nodo consiste en una estación completa de medida de los siguientes parámetros, con cadencias horarias:
 - Temperatura ambiente, presión atmosférica y humedad relativa
 - Radiación neta en el aire de onda corta y de onda larga
 - Profundidad, temperatura del agua y conductividad eléctrica
 - Oxígeno disuelto, pH y redox
 - Carbonatos, nitratos, nitritos, carbono orgánico total, sólidos en suspensión y demanda química de oxígeno, mediante un sensor óptico de absorción espectral que trabaja en el rango de la luz UV.
 - Biomasa de cianobacterias (concentración de ficocianinas), mediante fluorímetro.
 - Biomasa de fitoplancton (concentración de clorofila a), mediante fluorímetro.
 - Materia orgánica disuelta (CDOM), mediante fluorímetro
 - Irradiancia hiperespectral mediante radiómetros (en aire y agua) para obtener información sobre la cantidad y calidad de la luz para el crecimiento de las algas.

- **TRIBUTARIOS**, ubicados en los propios tributarios y sus vertientes. Serán estaciones más sencillas para la medida en continuo de los parámetros siguientes:

- Caudal
- Temperatura del agua y conductividad eléctrica
- Oxígeno disuelto, pH y redox
- Nitratos, carbono orgánico total, sólidos en suspensión y demanda química de oxígeno

En base a este análisis se identifican los nodos TRIBUTARIOS como los componentes principales de la red WSN. Su ubicación y necesidades de medida (parámetros, frecuencia,...) constituyen los requerimientos de la arquitectura de red que se describe en el punto 4.

Para enviar los datos al usuario final a través de Internet esta red WSN de tributarios puede hacerlo a través del nodo PRINCIPAL o de manera independiente, según el escenario real concreto.

4. Arquitectura del Sistema WSN ROEM

4.1. Nodos WSN: Tipología y Arquitectura

Se han definido dos tipologías de nodos en la red WSN: Nodo Base y Nodo Satélite. El Nodo Base está compuesto por la estación base radio, encargada de recopilar toda la información de la red y volcarla al sistema, mientras que los Nodos Satélites son los que llevan integrados los diversos sensores encargados de medir los diferentes parámetros definidos.

Nodos Satélites

Los nodos satélites son los encargados de recabar información acerca del estado de eutrofización del embalse, por lo que estarán compuestos de un módulo radio inalámbrico (*note IRIS* de la compañía estadounidense *MEMSIC*, anteriormente perteneciente a Crossbow Technologies), junto con los diferentes sensores específicos de la zona donde se ubican: vertiente o tributario.

Dentro de los nodos satélites podemos distinguir otras 2 tipologías diferentes: nodo caudal y nodo multiparamétrico, diferenciándose en el juego de sensores que llevan integrados. A continuación se describe cada uno de ellos.

Nodo Caudal

Es el nodo ubicado en las diferentes vertientes existentes entorno a cada uno de los tributarios del embalse. En estos puntos el parámetro medible a tener en cuenta es el **Caudal Instantáneo**, puesto que junto con la medida del resto de parámetros en cada uno de los tributarios, se obtiene una estimación de los nutrientes aportados por cada una de esas vertientes.



Fig. 1. *Nodo Caudal: Mote IRIS, placa de adaptación y sensores*

Nodo Multiparamétrico

Tal y como ya se ha comentado con anterioridad, en el punto de encuentro de los diferentes afluentes es necesario tomar medidas de: nivel, temperatura, conductividad eléctrica, pH, potencial redox, oxígeno disuelto, espectro UV, sólidos en suspensión, demanda química de oxígeno equivalente, carbonatos, nitritos y nitratos.



Fig. 2. *Nodo Multiparamétrico: Mote IRIS, placa de adaptación y sensores*

Nodo central: pasarela de comunicaciones WSN

El Nodo Central está compuesto por la **estación base WSN**, encargada de recopilar toda la información de la red, un **servidor con base de datos** para almacenamiento de las muestras recogidas, y una **conexión 3G** que permita volcar la información al sistema de gestión central.



Fig. 3. *Nodo Central: estación base, servidor BD y conexión 3G*

Cabe destacar que se ha seleccionado como conexión de largo alcance la tecnología 3G/GPRS, debido al tipo de cobertura que presenta el escenario de pruebas finales. Otra posibilidad sería el establecimiento de un radioenlace WIMAX que presentase la cobertura necesaria para conectar las diferentes WSNs del embalse con el sistema de gestión central.

Arquitectura Global del Sistema de Comunicaciones

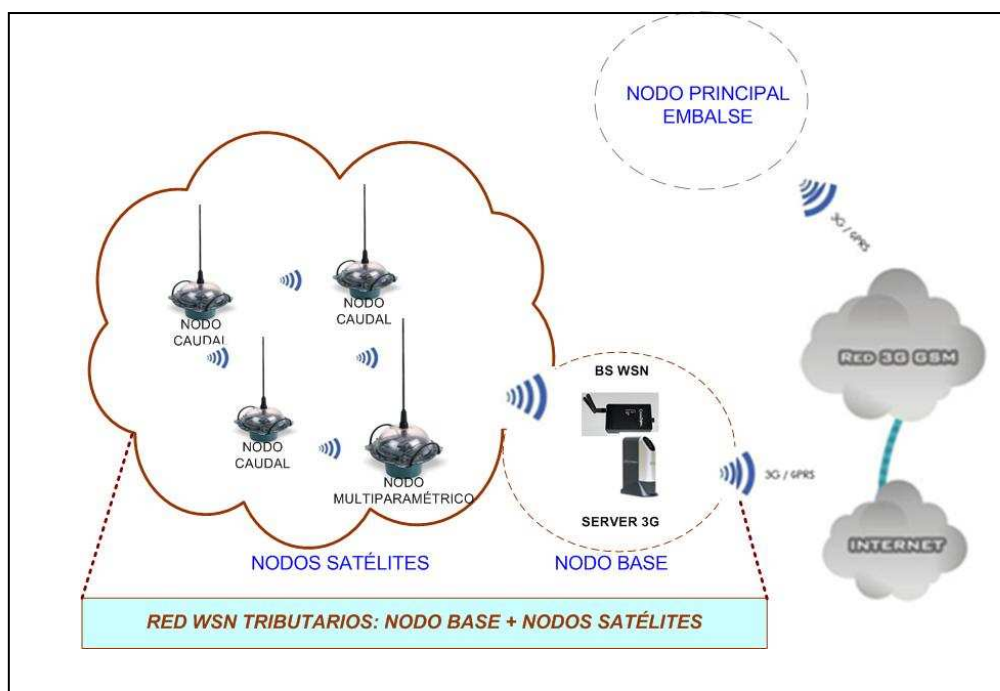


Fig. 4: Arquitectura Global del Sistema de Comunicaciones

4.2. Red WSN: Topología y Encaminamiento

La topología que mejor se ajusta al escenario planteado es la de una red mallada, encargada de distribuir la información entre los distintos puntos del embalse (vertientes, tributarios). Esta red está compuesta por el coordinador central (Gateway o Nodo Base) y de routers encargados de liberar de carga de comunicación al nodo base y de mejorar la comunicación dentro del embalse. Estos routers pueden ser además puntos de medida (nodos satélites), es decir, recopilan información de los sensores acoplados.

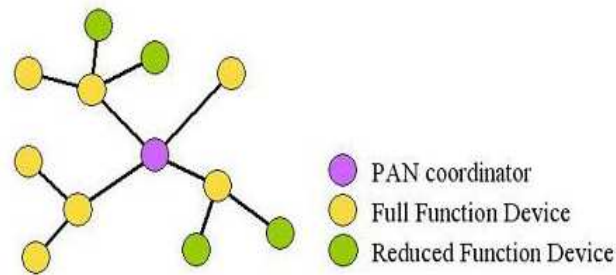
Tipos de Dispositivos

Según la topología establecida, se emplean los siguientes dispositivos definidos en el estándar:

- **Coordinador o Nodo Base:** es único en la red. Es el encargado de establecer la red inalámbrica y de coordinar a los demás nodos. Toda la información que circula en la red va a parar a este dispositivo, el cual estará conectado a un mini PC donde se procesarán y almacenarán los

datos. Este es el único elemento de la red que debe permanecer siempre activo, ya que no puede permitir la pérdida de datos.

- **FFD (Full Function Device) o Nodo Satélite:** como su nombre indica es un dispositivo de función completa. Actúa como *router* en la red para reenviar la información y se le añade la capacidad de recogida de



información, propia de los *nodos finales*.

Fig. 5. *Nodos de Red WSN: funcionalidades de Red*

Modo de Funcionamiento

En el estándar IEEE 802.15.4 se indican dos modos de funcionamiento, el modo beaconless y el modo beacon. En el caso de la red planteada, el modo de transmisión empleado sería el modo beacon, puesto que existe la figura de un coordinador central (Gateway o Nodo Central). Éste se encarga de transmitir beacons cada cierto tiempo para que el resto de nodos se puedan sincronizar, permitiendo en caso de necesidad una latencia mínima para aquellos dispositivos que necesiten tener este parámetro garantizado (transmisión con beacons y un tiempo de acceso garantizado). Como mecanismo de acceso al medio se utiliza CSMA-CA ranurado.

Metodología de Formación de la Red

En cuanto a la metodología de formación de red podemos ver que se mantiene una estructura similar a una red cluster-tree.

Un RFD (nodo sensor final) se conecta a una red cluster-tree como un dispositivo hoja al final de una rama puesto que los RFDs no permiten tener otros dispositivos asociados. Cualquiera de los FFDs (routers) puede actuar como un coordinador y proporcionar servicios de sincronización con otros dispositivos u otros coordinadores. Sólo uno de estos coordinadores puede ser el coordinador general, en este caso el nodo central WSN. Éste constituye el primer cluster eligiendo un identificador que no está siendo utilizado y transmitiendo tramas beacon de forma broadcast a todos sus vecinos (routers o nodos satélites). Un dispositivo que recibe una trama beacon podrá solicitar su unión a la red al coordinador. Si éste le permite unirse, añade al nuevo dispositivo como un hijo a su lista de vecinos. Posteriormente, el nuevo nodo añade al coordinador como nodo padre a su lista de vecinos y comienza a transmitir beacons de forma periódica, de forma que otro nuevo dispositivo podrá unirse a la red a través de él. Si éste último no es capaz de unirlo a la red con el coordinador, el nuevo nodo deberá buscar otro nodo padre.

5. Conclusiones

En este artículo se ha presentado la arquitectura de una red de sensores sin cables para la monitorización en tiempo real de parámetros fundamentales que influyen en el proceso de eutrofización de embalses. Se han analizado los principales requerimientos de un sistema completo, en cuanto a tipología de estaciones de medida necesarias (parámetros) y su ubicación en el entorno de un embalse, identificando la monitorización de parámetros en tributarios del embalse como caso de uso idóneo para el desarrollo de una red WSN. Finalmente se han abordado aspectos concretos de topología y encaminamiento de red partiendo de las especificaciones del estándar IEEE 802.15.4.

Actualmente se está finalizando la fase de validación del sistema mediante diversas pruebas en un embalse sometido a proliferaciones periódicas de cianobacterias potencialmente tóxicas.

6. Financiación

Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto ROEM “*Red de Observación de parámetros medioambientales para el estudio de la Eutrofización en embalses*”, financiado por el Ministerio de Industria Turismo y Comercio (plan Avanza I+D) y por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).



plan **avanza2**



7. Referencias

- [1] **Dickey, T. D., E. C. Itsweire, et al. (2008).** "Introduction to the Limnology and Oceanography Special Issue on Autonomous and Lagrangian Platforms and Sensors (ALPS)." *Limnology and Oceanography* 53(5): 2057-2061.
- [2] **Morgui, J.A., J. Armengol, & J.L. Riera. 1990.** Evaluación limnológica de los embalses españoles: composición iónica y nutrientes. *Comunicacions III Jornadas Españolas de Presas*. Barcelona.
- [3] **Arnau, P. y Canals, M., 2002.** Large vs small river systems in the Spanish Mediterranean: Damming impact on deltaic and coastal vulnerability; Joint European/North American EUROSTRATAFORM meeting, incorporating EURODELTA and PROMESS, Winchester, Reino Unido, 8-13 Septiembre, Conf. Progr., Abstr. and Gen. Inf. Vol., p. 24.
- [4] **Liquete C., Canals M., Arnau P., Urgeles R., Durrieu de Madron X. 2004.** The Impact of Humans on StrataFormation Along Mediterranean Margins *Oceanography (TOS)* , Vol: 17 , Nº: 4 pp: 70-79.
- [5] **Hurrell, J. W., 1995.** Decadal trends in the North Atlantic Oscillation regional temperatures and precipitation. *Science*, 269, 676-679.
- [6] **Hurrell, J. W., and H. van Loon, 1997.** Decadal variations in climate associated with the North Atlantic oscillation. *Climatic Change*, 36, 301-326.
- [7] **Heisler, J., P. Gilbert, et al. (2008).** "Eutrophication and harmful algal blooms: A scientific consensus." *Harmful Algae* 8: 3–13.

- [8] **Anderson, D., P. Glibert, et al. (2002).** "Harmful Algal Blooms and Eutrophication Nutrient Sources, Composition, and Consequences." *Estuaries* 25(4): 704-726.
- [9] **Chen, S., X. Chen, et al. (2009).** "A mathematical model of the effect of nitrogen and phosphorus on the growth of blue-green algae population." *Applied Mathematical Modelling* 33: 1097-1106.
- [10] **Dillenberg H.O. & Dehnel, M.K., 1960.** "Toxic waterbloom in Saskatchewan", 1959, *Canad. med. Ass. J.*, 83, 1960, p.1151.
- [11] **Senior, V.E., "Algal poisoning in Saskatchewan", *Canad. med. Ass. J.*, 24, 1968, p.26**
- [12] **Ministerio de Medio Ambiente.** Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. Libro Blanco del Agua, 1998.
- [13] **Monteoliva A.P., Muñoz C., 2.000.** La gestión limnológica y el mantenimiento de la integridad ecológica en los ecosistemas acuáticos artificiales (embalses y canales). Monografía de la Revista Obra Pública, "La Gestión Del Agua", 51(2). REVISTA DEL COLEGIO DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS.
- [14] **Codd GA, Metcalf JS and Beattie KA (1999).** Retention of *Microcystis aeruginosa* and microcystin by salad lettuce (*Lactuca sativa*) after spray irrigation with water containing cyanobacteria. *Toxicon* 37, 1181-1185.
- [15] **Costa SM and Azevedo SMFO (1994).** Implantação de um Banco de Culturas de Cianofíceas Tóxicas. *Iheringia - Série Botânica*, 45: 69-74.
- [16] **Codd GA, Bell SG, Kaya K, Ward CJ, Beattie KA and Metcalf JS (1999).** Cyanobacterial toxins, exposure routes and human health. *European Journal of Phycology* 34, 405-415.
- [17] **Falconer IR (1994).** Health implications of Cyanobacterial (blue-green algae) toxins. In: Toxic Cyanobacteria current status of research and management. Eds. Steffensen DA & Nicholson BC. Proceedings fo an International Workshop. Adelaide. Australia.
- [18] **Teixeira MGLC, Costa MCN, Carvalho VLP, Pereira MS and Hage E (1993).** Gastroenteritis epidemic in the area of the Itaparica, Bahia, Brazil. *Bulletin of PAHO*, 27(3): 244-253.
- [19] **Azevedo SMFO (1996).** Toxic cyanobacteria and the Caruaru tragedy. IV Simpósio da Sociedade Brasileira de Toxinologia.
- [20] **Paerl HW and David F Millie (1996).** Physiological ecology of toxic aquatic cyanobacteria. *Phycologia*. Volume 35, 160-167.
- [21] **Robillot C, Winh J, Puiseus-Dao S and Marie-Claire Hennion (2000).** Hepatotoxin production kinetic of the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* PCC 7820, as determined by HPLC- Mass Spectrometry and protein phosphatase bioassay. *Environ. Sci. Technol.* 34, 3372-3378.
- [22] **Heisler, J., P. Gilbert, et al. (2008).** "Eutrophication and harmful algal blooms: A scientific consensus." *Harmful Algae* 8: 3-13.
- [23] **Kenneth S. Johnson, J. A. N., Stephen C. Riser, William J. Showers, (2007).** Chemical Sensor Networks for the Aquatic Environment. *ChemInform* 38(19).