

Sistema de medida en ambientes industriales basado en redes de sensores inalámbricos

Alfonso González, Natacha Leone, Mauricio Murdoch, Pablo Mazzara y Julián Oreggioni

Instituto de Ingeniería Eléctrica
Universidad de la República
Montevideo, Uruguay

{alfgonz, nathybolso, mauriciomurdoch}@gmail.com, {mazzara,juliano}@fing.edu.uy

Resumen—La medida de temperatura y pH resulta de gran importancia en una amplia gama de procesos industriales. En particular, se destaca su importancia en el procesamiento del cuero dentro de los fulones giratorios de una curtiembre. Este trabajo presenta un sistema de medida de temperatura y pH, basado en una red de sensores inalámbricos, que fue probado en este tipo de instalación industrial. El prototipo construido consta de un nodo base y dos nodos sensores remotos alimentados con dos pilas AA. Estos últimos son los encargados de realizar las medidas y transmitirlos mediante enlaces de radio multi-hop al nodo base, conectado a un PC. El sistema incluye una aplicación para el usuario que corre en un PC que permite guardar y visualizar los datos, así como monitorear y configurar el sistema. El análisis de datos experimentales recabados en pruebas realizadas en la planta industrial muestran que el sistema es capaz de medir pH en el rango de 2 a 8 con una incertidumbre de 0,1 pH; y temperatura en el rango de 10°C y 70°C con una precisión de 0,5°C. Los principales aportes de este trabajo, consisten en la adaptación del sistema al ambiente industrial y el desarrollo de la interfaz eléctrica del sensor de pH a la plataforma de hardware elegida.

Palabras clave; red de sensores inalámbricos, ambiente industrial, pH, temperatura, bajo consumo.

I. INTRODUCCION

La medida de temperatura y pH resulta de gran importancia en varios de los procesos involucrados en la producción del cuero. En especial se destaca el “proceso de pelambre”, que consiste en colocar pieles dentro de un fulón y disolver el pelo utilizando cal y sulfuro de sodio. Un fulón es un recinto cilíndrico de madera de gran tamaño (aprox. 3 metros de diámetro por 3,5 metros de largo) como se observa en la Fig. 1. A lo largo del proceso, el fulón rota con una velocidad de 4 r.p.m. para lograr la correcta homogenización del proceso.

Tradicionalmente para sensar temperatura y pH se detiene el proceso, se abre una puerta lateral y se toma una muestra de la sustancia del interior. Esta manera de recabar las medidas no solo tiene el inconveniente de ser manual y de detener el proceso, sino que además, al abrir el fulón el operario queda expuesto a vapores que pueden ser nocivos para su salud. Otro método que se emplea es la utilización de “dataloguers” con sensores de temperatura colocados sueltos en el interior del fulón junto con las pieles. Estos recaban la información durante

el proceso y luego que termina, se extrae el “dataloguer” de entre las pieles y se levantan los datos en un PC para analizarlos. Este proceso evita los problemas del método anterior, ya que ni es manual ni detiene el proceso. En contrapartida no es en tiempo real y por tanto no puede controlar el proceso.

La opción que plantea este trabajo es desarrollar un sistema basado en una red de sensores inalámbricos. Esta alternativa permite obtener medidas en tiempo real sin necesidad de interrumpir el proceso, elimina la posibilidad de errores humanos al tomar o registrar la medida y minimiza los riesgos para la salud del operario. Asimismo, la solución es escalable y el costo de mantenimiento es bajo. En contrapartida, la utilización de esta tecnología en esta aplicación se ve dificultada, tanto por el giro de los fulones como por la propagación de las ondas de radio en un ambiente industrial.



Figura 1. Fulón utilizado en la validación del sistema

Las redes de sensores inalámbricos se han aplicado con éxito al monitoreo de condiciones ambientales [1][2]. Al aire libre, la calidad de los enlaces es buena, pero en ambientes cerrados las reflexiones y refracciones de las ondas en las paredes y objetos provocan interferencias que disminuyen el alcance y la calidad de la comunicación.

En [3] varias configuraciones de redes de sensores son analizadas simulando un ambiente industrial generando interferencia. En [4] se comparan distintas arquitecturas de redes de sensores para aplicaciones industriales de mantenimiento preventivo y se concluye que el costo de la inversión es bajo comparado con los resultados que se pueden obtener.

El desarrollo alcanzado por los últimos estándares [5], permiten mejorar la comunicación mediante el uso de espectro expandido y usando combinaciones de 802.15.4 con redes 802.11 tipo malla [6].

El trabajo que presenta este documento consistió en el desarrollo de un sistema de medida de temperatura y pH, basado en una red IEEE 802.15.4 tipo árbol, capaz de funcionar en un ambiente industrial. Se realizaron pruebas en laboratorio con tres motes: el nodo base y dos nodos sensores, uno midiendo temperatura y pH y el tercero midiendo temperatura. Además se validó el sistema tomando medidas de pH y temperatura en la planta industrial de una curtiembre. Se construyó un encapsulado especial para el sensor de temperatura que permitió colocarlo dentro del fulón y medir temperatura durante el proceso de curtido de la piel. El nodo con el sensor de pH se probó realizando medidas de muestras extraídas del fulón en el ambiente industrial. Finalmente, se validó su proceso de calibración.

II. DISEÑO E IMPLEMENTACION

A. Características del sistema

El sistema (ver Fig. 2) consiste en un nodo base conectado a un PC y en nodos sensores que se encuentran instalados en los fulones.

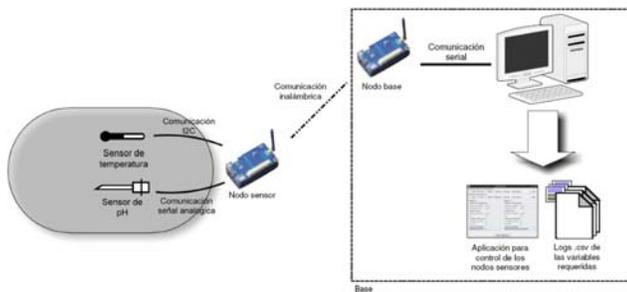


Figura 2. Esquema del sistema desarrollado.

En el PC corre una aplicación para el usuario que permite el registro y manejo de los datos, el monitoreo en tiempo real y la modificación de parámetros en línea.

Para implementar los nodos sensores y el nodo base se utilizó la plataforma IRIS de la empresa Crossbow [7], cuyos módulos (llamados Motes) consisten básicamente en un microcontrolador y una radio. Los Motes permiten recibir información a través de sus interfaces, procesarla y transmitirla inalámbricamente hacia otro nodo o hacia un PC. Las principales características de la plataforma de hardware utilizada se muestran en la Tabla I.

El sistema es escalable hasta una cantidad máxima de 255 nodos sensores por cada nodo base. Los nodos sensores pueden tener entre ellos una distancia en el orden de 50 metros bajo techo y un orden de magnitud mayor al aire libre.

TABLA I. CARACTERÍSTICAS DE LA PLATAFORMA IRIS

| Microcontrolador | |
|--------------------------------|------------------|
| Memoria flash para programa | 128 kB |
| RAM | 8 kB |
| Frecuencia | 7.37 MHz |
| Convertor A/D | 10 bits |
| Otras interfaces | E/S digital, I2C |
| Almacenamiento de datos | |
| Memoria flash externa | 512 kB |
| Transceiver de RF | |
| Banda de frecuencia | 2.4 GHz |
| Velocidad de transmisión | 250 kbps |
| Alimentación | |
| 2 pilas AA | 3 V |

Los nodos sensores se alimentan con dos pilas AA cuya duración estimada es de más de un año para una topología en estrella. Este trabajo estuvo orientado a optimizar el consumo de los sensores, dejando para una siguiente etapa la optimización del consumo utilizado en las comunicaciones. A este nivel, el sistema se limitó a hacer uso del protocolo LPL (Low Power Listening) implementado en TinyOS. [8]

Se diseñaron y fabricaron los circuitos eléctricos de adaptación del sensor de pH y del sensor de temperatura al Mote. El sistema permite trabajar con un período de muestreo mínimo de 1 minuto y es capaz de medir temperatura entre 10°C y 70°C con una incertidumbre de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ y una resolución de 0,25°C. Por otra parte, es capaz de medir pH entre 2 y 8 pH con una incertidumbre de $\pm 0,1$ pH y una resolución de 0,1 pH.

B. Plataforma de software embebido

El software embebido en los nodos sensores para la adquisición de las medidas y en el nodo base de interfaz entre el nodo sensor y la PC, se implementó sobre TinyOS 2.1. Se trata de un sistema operativo de código abierto específico para redes de bajo consumo desarrollado por la Universidad de Berkeley [8].

Para implementar la comunicación entre los nodos sensores y el nodo base se programó una aplicación basada en dos protocolos de comunicación de TinyOS: Collection y Dissemination. También se utilizó el protocolo LPL para el manejo del encendido de la radio.

El protocolo Collection [8] se utiliza para comunicar los datos recabados por los nodos sensores. La arquitectura de la red es de tipo árbol, donde en las puntas del mismo se encuentran los nodos sensores y en la base el nodo base

conectado al PC. El protocolo es de tipo multi-hop y best-effort.

El protocolo Dissemination [8] se utiliza para enviar los cambios solicitados por el usuario a través del PC. En este protocolo todos los nodos de la red tienen, en régimen, el mismo valor en todas las variables. El protocolo no asegura un tiempo de espera máximo para que todos los nodos reflejen el cambio pero el algoritmo usado tiende a unificar rápidamente el valor.

El protocolo LPL se ubica a nivel de la capa MAC, es asíncrono y permite ahorrar energía disminuyendo el tiempo en que la radio está preñida (se establece un “duty cycle” o ciclo de trabajo de la radio).

C. Sensor de temperatura

Para medir temperatura se utilizó el sensor integrado DS620 de Maxim. Este chip mide la temperatura del ambiente y puede transmitir ese dato en formato digital mediante la interfaz serial I2C. Se destaca su bajo consumo en modo “idle” y que puede funcionar con una alimentación de 1.7V (ver detalles en Tabla II). En la Fig. 3 se muestra una foto del circuito de medición de temperatura fabricado.

TABLA II. CARACTERÍSTICAS DEL CHIP DS620

| | |
|----------------------------------|-----------------------|
| Rango de voltaje de alimentación | 1.7 ... 3.5 V |
| Rango de operación | -55 ... 125 °C |
| Precisión | ±0.5 °C @ 0 ... 70 °C |
| Resolución | 11 bits (0.25 °C) |
| Velocidad de conversión | 50 ms |
| Interfaz | Serial I2C |
| Consumo en modo idle | 2 μA |
| Consumo en conversión | 800 μA |

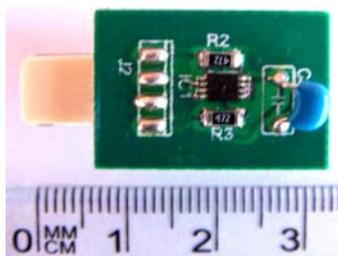


Figura 3. Circuito de medición de temperatura fabricado.

D. Sensor de pH

Se implementó un sensor de pH basado en un electrodo de vidrio debido a su bajo costo y a su amplio desarrollo en el ámbito industrial. El funcionamiento de este electrodo se modela mediante una celda galvánica; es decir, el electrodo desarrolla un potencial eléctrico, que responde a la ecuación de Nernst, que es función del pH y la temperatura de la solución que se quiere medir. Este electrodo no presenta consumo desde

el punto de vista eléctrico, posee una muy alta resistencia de salida (centenas de mega ohms) y su característica pH-Voltaje tiene una deriva temporal que debe corregirse mediante calibración periódica.

El circuito debió respetar los siguientes requerimientos: alimentación asimétrica entre 0 y VDD (con un VDD que podía variar entre 2V y 3V para contemplar la caída que sufren las pilas AA), bajo consumo y capacidad para trabajar con señales de pH que pudieran variar entre 2 pH y 8 pH.

Para integrar el electrodo de pH al Mote se diseñó un circuito electrónico (ver Fig. 4) basado en un desarrollo anterior [9]. El principal aporte del nuevo diseño es que incorpora un método para compensar automáticamente la deriva del electrodo de pH y de este modo aumentar la vida útil del sensor.

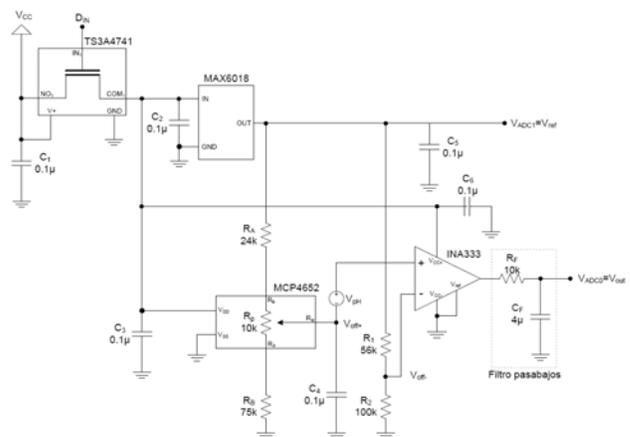


Figura 4. Esquema del circuito desarrollado para medir pH.

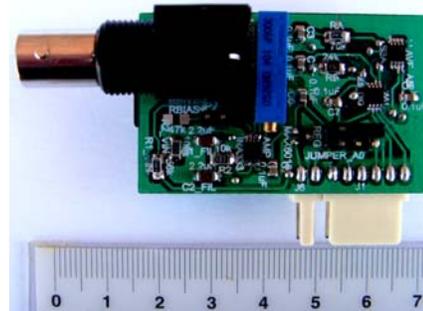


Figura 5. Circuito fabricado para medir pH.

El circuito tiene cinco componentes principales. Una llave analógica (TS3A4741 de Texas Instruments) que tiene como propósito encender el circuito solamente durante el período de tiempo que se toma una medida de modo de poder optimizar el consumo. Un amplificador de instrumentación (INA333 de Texas Instruments) de muy alta resistencia de entrada que permite maximizar la resolución del convertor A/D. Un filtro pasabajos a la salida que disminuye el ruido electromagnético. Un voltaje de referencia (MAX6018 de Maxim) que se utiliza para obtener un potencial constante independiente del voltaje

de la pila. Un potenciómetro digital (MCP4652 de Microchip) se utiliza para sumar una constante al voltaje del electrodo de vidrio. La constante se establece desde el micro-controlador del Mote mediante la interfaz serial I2C y permite compensar la deriva hacia valores negativos, que experimenta con el tiempo, el electrodo de vidrio. En la Fig. 5 se muestra una foto del PCB desarrollado.

E. Interfaz con el usuario

La aplicación para el usuario que corre en el PC fue desarrollado en Java. Al ejecutar la aplicación se abre la ventana principal del programa, que se divide en tres secciones (ver Fig. 6). En la sección superior se puede seleccionar el período de muestreo de temperatura y de pH de los nodos sensores. En la sección central se encuentran los paneles de cada fulón. En la sección inferior se tiene un botón para iniciar la calibración del sensor de pH de un nodo sensor.



Figura 6. Ventana principal de la aplicación.

F. Montaje

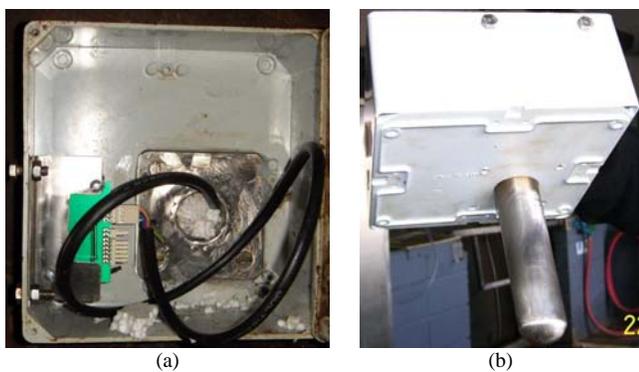


Figura 7. Montaje del sensor de temperatura (a) vista interior del encapsulado del nodo sensor (b) vista exterior del encapsulado del nodo sensor con detalle de la vaina de metal que contiene el circuito de medición de temperatura.

El encapsulado del nodo sensor utilizado fue una caja estanca estándar de 15cm x 15cm, IP66, con una tapa con tornillos según puede observarse en la Fig. 7

El encapsulado del nodo sensor posee la robustez necesaria para trabajar en un ambiente industrial, y en particular es apto para soportar los vapores corrosivos de los procesos con los cuáles debe estar en contacto. Asimismo, prevé un mecanismo para cambiar las pilas y calibrar el sensor de pH. Finalmente es funcional a los intereses del dispositivo: los componentes internos entran adecuadamente, están protegidos, etc.

La vaina de metal (ver Fig. 7.b), que protege al circuito de medición de temperatura, se diseñó teniendo en cuenta que debía soportar las sustancias altamente corrosivas en las que se encontraría inmersa. Por otra parte, fue considerado que debe ser lo más pequeña posible, para tener una buena transferencia térmica entre el chip que mide la temperatura y la sustancia a medir. Finalmente, la vaina tiene el tamaño adecuado para alojar al circuito de medición de temperatura.

III. RESULTADOS

A. Fuente de alimentación

Para relevar el mínimo voltaje de alimentación con el cual el nodo sensor es capaz de funcionar se realizó la siguiente prueba: se dejó el nodo sensor todo el tiempo encendido, midiendo temperatura y pH y enviando los datos al nodo base. Esta prueba reveló que el nodo sensor es capaz de funcionar hasta una alimentación de 1,9V y que es el Mote quien deja de funcionar correctamente.

B. Consumo

Para medir el consumo del circuito se colocó una resistencia de 1 ohm en serie con la alimentación y se realizaron diversas medidas según las distintas funciones que debe realizar el Mote. Esto permitió corroborar el bajo consumo de los sensores (menor a 30µA) y detectar el alto impacto que tiene el consumo del Mote en el funcionamiento del sistema (1.3mA).

C. Validación del circuito para medir pH

Se relevaron y compararon las medidas obtenidas por un sensor de pH comercial (EcoSense pH100 de YSI) y por el sensor de pH realizado en este proyecto (utilizando el electrodo InLab 413 de Mettler Toledo).

La Fig. 8 muestra las medidas relevadas con sus intervalos de confianza correspondientes. Allí puede verse que las medidas de ambos sensores son consistentes.

D. Medidas en ambiente industrial

Se realizaron varios ensayos en la planta industrial de una curtiembre de gran porte (30 fulones distribuidos en más 15000m²), capaz de procesar entre 5000 y 6000 cueros terminados por día (cueros que miden en promedio más de 4m²).

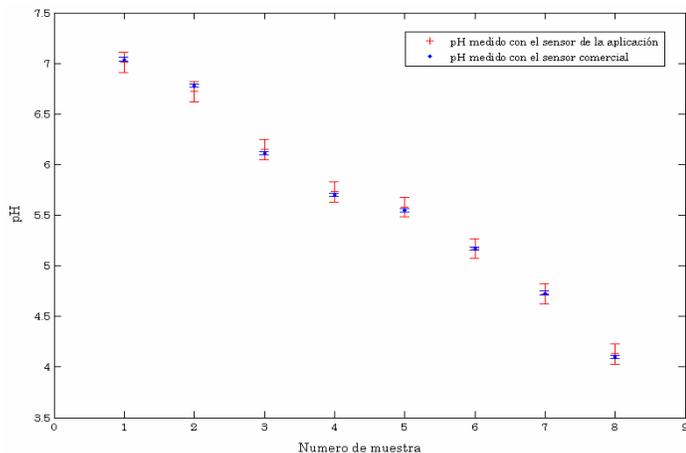


Figura 8. Gráfica de comparación de electrónicas de pH

Todos los ensayos fueron realizados utilizando un nodo sensor montado en un fulón y un nodo base conectado a un PC a una distancia de 30 metros.

El experimento más largo tuvo una duración de 108 horas, tomando medidas de temperatura cada 2 minutos, obteniendo una tasa de pérdida de paquetes del 13%.

En la Fig. 9 se muestran medidas de temperatura tomadas por el sistema a lo largo de 42 horas. Durante las primeras 10 horas de la gráfica puede apreciarse la parte final del proceso de pelambre. Luego, se dejó enfriar el fulón a temperatura ambiente durante aproximadamente 20 horas. El último tramo corresponde al inicio de un nuevo proceso en donde se agrega hielo y puede observarse cómo baja rápidamente la temperatura. Los resultados fueron validados por operarios expertos.

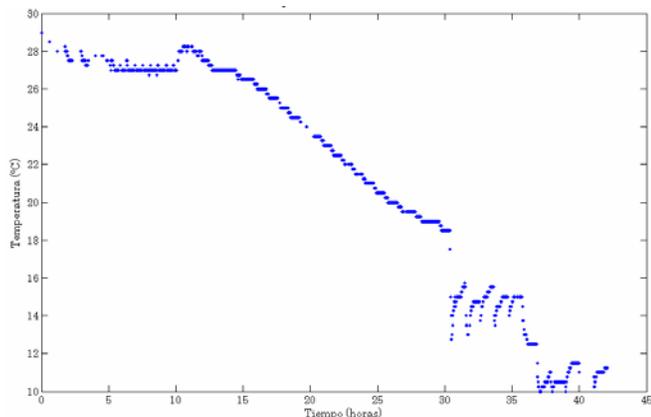


Figura 9. Gráfica de medida de temperatura en la planta industrial.

IV. CONCLUSIONES

Se logró implementar un sistema para medir temperatura y pH basado en una red de sensores inalámbricos en un ambiente industrial.

Por una parte se destaca que se lograron satisfacer todos los requerimientos de la aplicación. En primer lugar el sistema es de muy fácil instalación (no requiere cableado alguno). En segundo lugar, brinda información en tiempo real de las variables importantes del proceso, mejorando el seguimiento del proceso y el control del mismo. Finalmente, introduce mejoras sustanciales respecto al proceso actual de medida: no es necesario detener el proceso, se eliminan posibles errores de operación y de registro, y es un sistema más seguro para la salud del operario.

En la experiencia realizada, la comunicación entre los nodos sensores y la base presentó una tasa de pérdidas del 13%, y se estimó que la duración de las pilas no superaría los tres meses. El uso de una red tipo árbol y un protocolo de disseminación, que no permitía disminuir demasiado el ciclo de trabajo de la radio, redujo considerablemente la estimación inicial de consumo. Estos parámetros pueden ser mejorados usando otro protocolo. En efecto, existen protocolos para monitoreo de medio ambiente que permiten duraciones de las pilas de varios años [10] y [11], pero portarlos a nuestra plataforma no era un objetivo de esta etapa. Por otra parte, mediante la multiplicidad de caminos en una red tipo malla se puede disminuir las pérdidas de paquetes, pero en nuestro caso, por tratarse de un primer prototipo, sólo se usaron a lo sumo tres nodos.

Finalmente se destacan dos aspectos interesantes del diseño del circuito electrónico diseñado para este sistema. Por un lado, la corrección automática de la deriva del electrodo de pH utilizando un potenciómetro digital funciona adecuadamente. Por otro lado, se obtuvo un circuito que funciona con una alimentación de 2.0V, lo cual permite hacer un uso bien intensivo de las dos pilas AA.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Fernando Silveira, Conrado Rossi, Raúl Arbiza y a la curtiembre Zenda por el apoyo brindado.

REFERENCIAS

- [1] A. Cerpa, J. Elson, D. Estrin, L. Girod, M. Hamilton and J. Zhao, "Habitat monitoring: Application driver for wireless communications technology", In Proceedings of the 2001 ACM SIGCOMM Workshop on Data Communications in Latin America and the Caribbean, San José, Costa Rica, Apr. 2001.
- [2] R. Szewczyk, E. Osterweil, J. Polastre, M. Hamilton, A. Mainwaring, and D. Estrin, "Habitat monitoring with sensor networks", Communications of ACM 47, 6 (2004), 34-40.
- [3] M. Bertocco, G. Gamba, A. Sona, and S. Vitturi, "Performance Measurements of CSMA/CA-Based Wireless Sensor Networks for Industrial Applications", In Proceedings of the IMTC 2007 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Warsaw, Poland, May 2007.
- [4] L. Krishnamurthy, R. Adler, P. Buonadonna, J. Chhabra, M. Flanigan, N. Kushalnagar, L. Nachman and M. Yarvis, "Design and Deployment of Industrial Sensor Networks: Experiences from a Semiconductor Plant and the North Sea", In Proceedings of the Third International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, pp. 64-75, San Diego, CA, USA, Nov. 2005.
- [5] 802.15.4-2006 IEEE Standard for Information Technology, Part 15.4: Wireless MAC and PHY Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs).

- [6] D. Sexton, M. Mahony, M. Lapinski and J. Werb, "Radio Channel Quality in Industrial Wireless Sensor Networks", In Proceedings of the Sicon 05 – Sensors for Industry Conference Houston, Texas, USA, Feb. 2005.
- [7] IRIS 2.4 GHz. Crossbow Technology, Inc. [on line] Available: <http://www.xbow.com/Products/productdetails.aspx?sid=264>
- [8] TinyOS Community Forum, An open-source OS for the networked sensor regime. [on line] Available: <http://www.tinyos.net>
- [9] J. Oreggioni, J. Curto, M. Cebey, P. Aguirre and P. Chilibroste, "Anubis: Un sistema de monitoreo del rumen bovino". In Proceedings of the 5to. Congreso Iberoamericano de sensores IBERSENSOR. Montevideo, Uruguay, Set. 2006, ISBN 9974-0-0337-7.
- [10] N. Burri, P. von Rickenbach and R. Wattenhofer, "Dozer: ultra-low power data gathering in sensor networks", In Proceedings of the 6th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN '07), pages 450–459. ACM Press, New York, Apr. 2007. ISBN:978-1-59593-638-X
- [11] R. Lim, M. Woehrle, A. Meier and J. Beutel, "Harvester: Energy Savings Through Synchronized Low-power Listening", In Proceedings of the 6th European Conference on Wireless Sensor Networks (EWSN 2009), Cork, Ireland, Feb. 2009.