

Monitorización de Transportes frigoríficos de hortalizas mediante Redes Inalámbricas de Sensores tipo ZigBee

Ruiz-Garcia, L.⁽¹⁾; Barreiro, P.⁽¹⁾; Robla, J. I.⁽²⁾; Anand, A.⁽³⁾

⁽¹⁾ Laboratorio de Propiedades Físicas y Tecnologías Avanzadas en Agroalimentación. ETSI Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid. Avda. Complutense s/n 28040 Madrid. España. E-mail: luis.ruiz@upm.es

⁽²⁾ Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM-CSIC). Avda. Gregorio del Amo, 8, 28040, Madrid. España

⁽³⁾ Agricultural & Food Engineering. Indian Institute of Technology. Kharagpur. India.

Resumen

Los productos alimentarios perecederos tales como hortalizas, frutas, carne o pescado requieren transporte refrigerado. El control de la calidad y supervisión de los productos durante su transporte y distribución es de gran importancia para los operadores logísticos, donde el mayor reto es asegurar una cadena de frío continua desde el productor hasta el consumidor. Las empresas involucradas necesitan mejores métodos que garanticen la calidad de sus productos de cara a los consumidores. Para optimizar las condiciones de transporte de los productos alimentarios es necesario desarrollar sistemas automáticos de monitorización y control de los envíos. El presente artículo presenta un estudio experimental de monitorización de un transporte frigorífico de lechugas *Little Gem* (Lechuga baby o cogollo) desde Murcia hasta Francia, usando una red inalámbrica de sensores basada en el protocolo ZigBee/IEEE 802.15.4. La red estaba compuesta de cuatro nodos y una puerta de enlace. Las condiciones de transporte, fiabilidad de las comunicaciones y propiedades psicrométricas han sido analizadas. La aplicación del modelo psicrométrico de la ASABE permitió la detección inmediata de los cambios en contenido del agua del ambiente, estimando la condensación sobre la superficie del producto y las pérdidas de agua del mismo.

Abstract

Perishable food products such as vegetables, fruit, meat or fish require refrigerated transports. Quality control and monitoring of goods transportation and delivery services is a main issue in the refrigerated transport industry, where the major challenge is to ensure a continuous 'cold chain' from producer to consumer. Parties involved need better quality assurance methods to satisfy customer demands and to create a competitive point of difference. Successful transport in food logistics calls for automated and efficient monitoring and control of the shipments. Specialized wireless sensor networks monitoring devices promise to revolutionize the shipping and handling of a wide range of perishable products. This paper presents an experimental study about monitoring refrigerated transportation by truck of lettuce var. Little Gem, from Murcia (Spain) to Avignon (France) using a multihop wireless sensor network based in the ZigBee/IEEE 802.15.4 protocol. Four motes (transmitters) and one base station (receiver) were used. Transport conditions, communications reliability and the psychrometry has been studied. Psychrometric charts give information about water loss and condensation over the product during the shipment.

Palabras clave (Keywords)

Redes inalámbricas, sensores, monitorizar, transporte, logística,
Wireless sensor networks, sensing, monitoring, transportation, logistics

1. Introducción

Los productos perecederos, tales como frutas, verduras, carne o pescado, pueden sufrir daños y pérdida de calidad debido a descontroles en la cadena de frío. Por ello es fundamental una correcta supervisión y control de su logística. En este campo, las redes inalámbricas de sensores (WSN) disponen de un gran potencial para monitorizar diferentes entornos, como son el transporte, almacenamiento y distribución (Qingshan et al., 2004; Wang et al., 2006; Jedermann et al., 2007; Ruiz-Garcia et al., 2008). El uso de las WSN en ambientes refrigerados ha sido validado mediante la experimentación en almacenes frigoríficos de mayoristas de frutas y hortalizas (Ruiz-Garcia et al., 2008). Sin embargo, hasta la fecha no se han realizado ensayos en transportes frigoríficos con este tipo de redes. En esta ponencia se presenta el trabajo experimental realizado con WSN para monitorizar transportes internacionales de frutas y hortalizas en camiones frigoríficos. Los experimentos se centraron en el uso de tecnología ZigBee/IEEE 802.15.4, ya que por sus prestaciones y bajo consumo se considera la más apropiada para esta aplicación (Jedermann et al., 2007).

2. Materiales y Métodos

Para la realización del ensayo se escogió un transporte de lechugas *Little Gem* (lechuga baby o cogollos), no envasadas bajo cubierta protectora. El trayecto fue desde la central de Hortamira, en San Javier (Murcia), hasta un centro mayorista en Aviñón (Francia), durante 36.25 horas, a lo largo de 1051 km.

Se montaron junto con la carga 4 motes ZigBee/IEEE 802.15.4 (ver figura 1). Cada uno de estos motes lleva cuatro sensores: Sensirion SHT (temperatura y humedad relativa), Intersema MS5534B (presión y temperatura), TAOS TSL2550D (intensidad de luz) y ADXL202JE (aceleración en dos ejes). La frecuencia de adquisición de datos se fijó en 1Hz. La potencia de radio frecuencia de los motes puede ser configurada entre 24dBm y 0dBm. Para este experimento, la potencia se fijo a 0dBm (1mW aproximadamente).

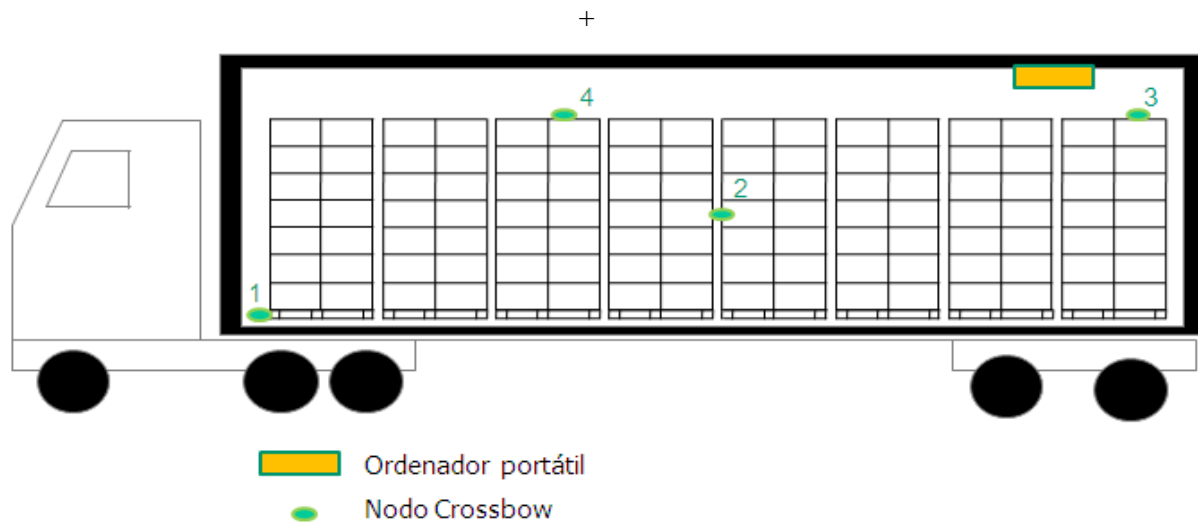


Figura 1: Montaje experimental

Se eligió una topología de red en malla (Figura 2), en la que cada nodo puede enviar la señal directamente al coordinador de red, que hace la función de puerta de enlace al ordenador donde se registran los datos, o al nodo que tenga más cerca y de allí al coordinador u a otro nodo.

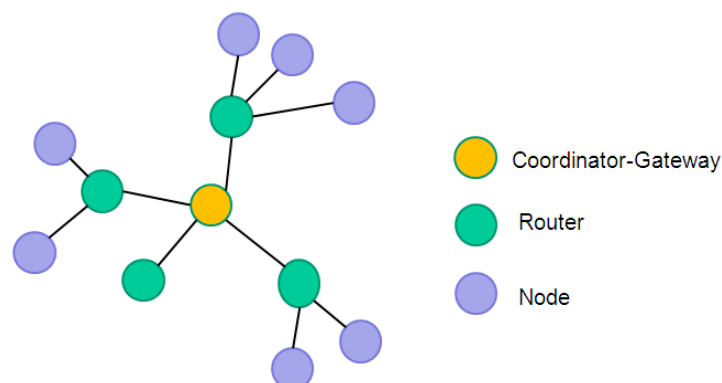


Figura 2: Topología de red en malla

A partir de los datos medidos en durante el transporte y basándonos en el modelo psicrométrico ASAE D271.2 se determinó la humedad absoluta en función de la temperatura y humedad relativa para la presión atmosférica (ASABE Standards, 2006).

Modelo psicrométrico

El modelo psicrométrico desarrollado por la ASABE se ha utilizado para el establecer el conjunto de las propiedades psicrométricas del aire. Las ecuaciones 4, 5, 6, 7 y la Tabla 1 permiten el cálculo de la presión de saturación y la presión de vapor, así como de la

humedad absoluta a partir de las medidas obtenidas con los sensores. Nótese que la presión de saturación responde a una expresión distinta en función del rango de temperaturas, < 0°C para la Ecuación 4 y > 0°C en el caso de la Ecuación 5.

$$P_s = e^{31.9602 - \frac{6270.3605}{T} - 0.46057 \cdot \ln T} \quad (4)$$

$$-528,53^\circ\text{C} \leq T \leq 0^\circ\text{C}$$

$$P_s = R * e^{\frac{A+B*T+C*T^2+D*T^3+E*T^4}{F*T-G*T^2}} \quad (5)$$

$$0^\circ\text{C} \leq T \leq 260^\circ\text{C}$$

T =Temperatura (K), P_s = Presión de saturación de vapor (Pa) (ASABE, 2006).

$$P_v = P_s \frac{RH}{100} \quad (6)$$

P_v = Presión de vapor (Pa) (ASABE, 2006).

$$H = \frac{0.6219 * P_v}{P_{atm} - P_v} \quad (7)$$

H =Humedad absoluta (g/kg aire seco), P_{atm} = Presión atmosférica (Pa) (ASABE, 2006).

Tabla 1: Coeficientes usados para calcular el diagrama psicrométrico (ASABE, 2006), para $T >$.

R=22,105,649.25	D=0.12558x10 ⁻³
A=-27,405.526	E=-0.48502x10 ⁻⁷
B=97.5413	F=4.34903
C=-0.146244	G=0.39381x10 ⁻²

3. Resultados y Discusión

3.1. Fiabilidad de las comunicaciones

Durante el experimento, solo se recibieron medidas de los motes 3 y 4 (Tabla 2). Del mote 1, que estaba situado en la parte frontal del semirremolque y parte baja del pallet, y del mote 2, situado en la zona central del semirremolque y a una altura intermedia del pallet, no se recibieron datos. El mote 3 estaba más cerca del coordinador, pero se encontraba dentro de una caja completamente rodeado por las lechugas. Es decir, el mote 3 refleja las

condiciones del producto mientras que el mote 4 estaba en contacto directo con el aire de la parte superior del camión. Aunque el mote 4 estaba más alejado que el 3 la comunicación fue mucho mejor (solo un 4,5% de paquetes perdidos) debido al espacio libre entre el mote y el coordinador.

Tabla 2: Porcentaje de paquetes perdidos durante el transporte y su error estándar.

	Mote 1	Mote 2	Mote 3	Mote 4
Paquetes válidos recibidos	0	0	2913	11310
% de paquetes perdidos	100%	100%	75.4%±0.28%	4.5%±0.14%

3.2. Condiciones ambientales

La temperatura media registrada por los sensores durante el transporte fue de 5.33 °C, con un máximo de 11.98 °C para el mote 3 (producto) y 8.76°C para el mote 4 (canal de aire) y un mínimo de 4.73°C para el mote 3 (producto) y -2.61°C para el mote 4 (canal de aire). La mayor parte del tiempo (98%) la temperatura se sitúa por encima del umbral permitido para la temperatura óptima recomendada (0 ± 0.5 °C), 100% del tiempo en el caso del mote 3 (producto). La humedad relativa (HR) estuvo entre el 55 y el 90%; siendo la humedad relativa óptima de conservación para la lechuga del 95%. Es decir, el 100% del tiempo el ambiente estuvo fuera del rango de HR recomendado, aspecto de especial relevancia teniendo en cuenta que el producto no se encontraba envasado bajo cubierta protectora.

3.3. Identificación del acceso a la carga y vibraciones

El sensor de luz permitió detectar los momentos de carga y descarga del camión, así como las aperturas de las puertas durante el trayecto (Figura 3). Los datos registrados con los acelerómetros muestran claramente cuando el camión estuvo parado y cuando estaba en movimiento (Figura 4), con una elevada oscilación debida a las vibraciones del vehículo. Dado que el acelerómetro es biaxial y debido asimismo a su colocación no se disponen de aceleraciones en el eje vertical. De esta manera se pueden registrar los tiempos de descanso del conductor.

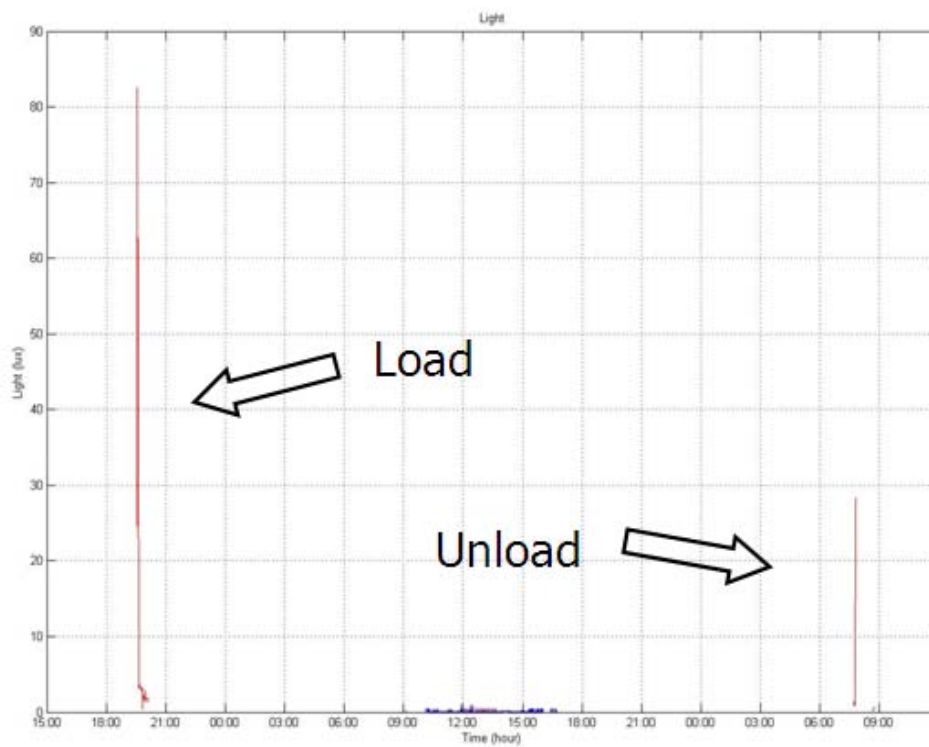


Figura 3: Detección de la luz durante el transporte. El azul representa al mote 3 y el rojo al mote 4.

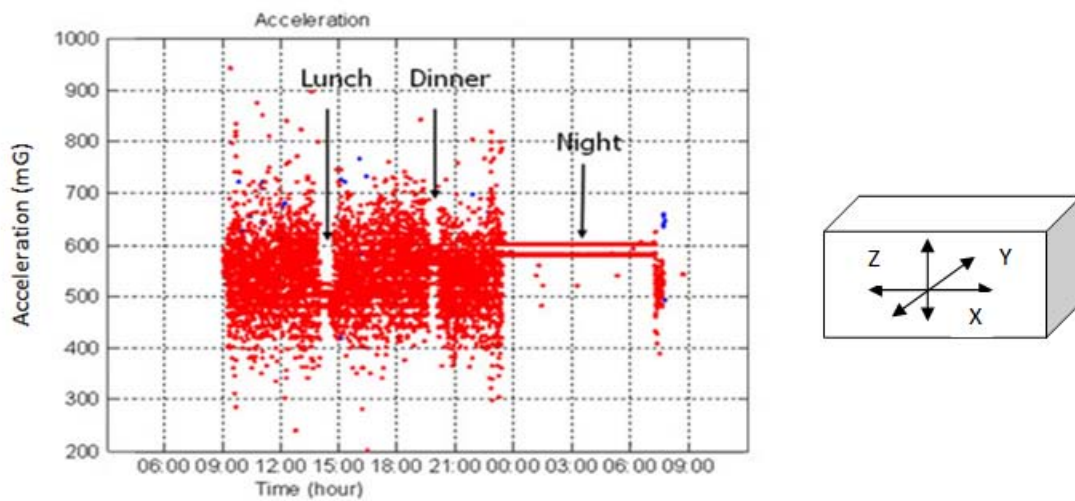


Figura 4: Aceleración en los ejes X e Y para los dos motes. El azul representa el mote 3 y el rojo el mote 4.

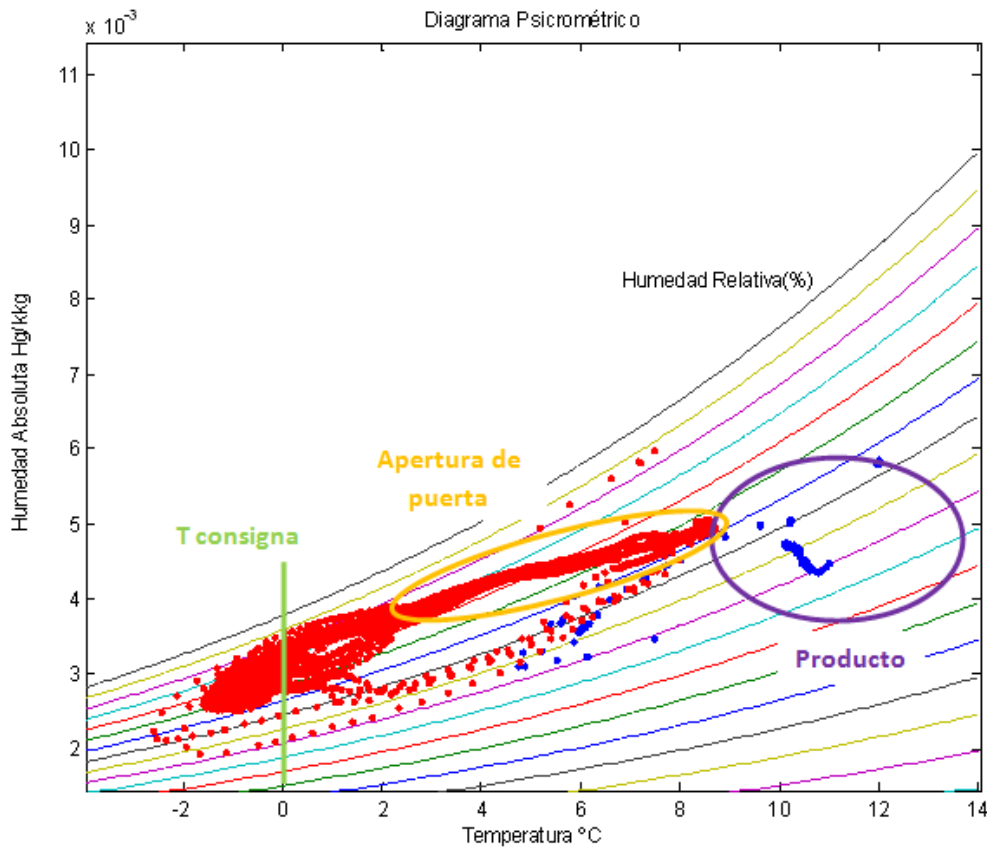


Figura 5: Diagrama Psicrométrico. Las líneas de colores indican humedad relativa; el color azul representa al mote 3 y el rojo al mote 4).

En la Figura 5 se puede observar la evolución de la humedad absoluta del aire (H , kg de agua/ kg aire seco) en relación a la temperatura durante el trayecto, se observa que la apertura de la puerta provoca un claro incremento de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y Humedad (g/kg), lo cual indica la entrada de aire exterior. Si se conociese la temperatura y humedad relativa del ambiente exterior se podría calcular la masa de aire del exterior que entra. Las variaciones de la humedad absoluta, en los instantes en que no existe apertura de puerta, permiten establecer si se están produciendo condensaciones de agua (pérdida de humedad absoluta) o evaporaciones de agua (incremento de humedad absoluta en el aire).

Por otra parte, el modelo psicrométrico permite establecer la entalpía del agua en función de la temperatura y se podría por tanto determinar el consumo de energía debido a la entrada de agua del exterior. También es posible acotar la duración de apertura de la puerta y su efecto sobre el consumo de energía.

3.4. Discusión

El porcentaje de paquetes perdidos en redes inalámbricas de sensores, dentro del ámbito agroalimentario, ha sido estudiado por varios autores. Dicho porcentaje depende en gran medida de la frecuencia a la que funcionen y de la presencia de obstáculos entre el emisor y el receptor. Los resultados provenientes de la experimentación en cámaras frigoríficas con WSNs con motes ZigBee a 2.4GHz mostraron un bajo porcentaje de paquetes perdidos, con un máximo de 15.73% en el laboratorio y 4.74% en almacenamiento de mayoristas (Ruiz-Garcia et al., 2008). En el caso de Ipema et al. (2008) que monitorizaron vacas utilizando motes a 433Mhz, se perdieron más del 50% de los paquetes. En cambio Nadimi et al. (2008a y 2008b), que también realizó un seguimiento de ganado vacuno pero con motes a 2.4GHz, registro una pérdida del 25% de los paquetes cuando el receptor estaba a menos de 12.5 metros. Las WSN también han sido utilizadas para monitorizar cultivos, en este caso, durante la experimentación con motes a 868/916MHz en campos de cultivo de patata, se perdieron el 98% de los paquetes, disminuyendo hasta el 49% durante el segundo año (Baggio, 2005; Haneveld, 2007).

En cuanto al estudio de las propiedades psicrométricas del aire durante el transporte de productos hortofrutícolas, no se ha encontrado bibliografía que aborde el transporte desde el análisis psicrométrico. La inclusión de nuevos parámetros como la entalpia permitiría la realización de estudios energéticos.

4. Conclusiones

El tipo de red implementada durante el ensayo no fue adecuada para monitorizar completamente las condiciones de un transporte internacional de hortalizas. Se hace necesario utilizar motes con mayor potencia de radio frecuencia o incrementar el número de nodos para favorecer la comunicación nodo a nodo. Sin embargo, el análisis de los datos registrados proporcionó información útil sobre el transporte, acreditando descontrol en la temperatura de consigna (98% del tiempo), humedades relativas siempre por debajo de la humedad óptima (en algunos casos hasta más de 40%), detección de apertura de puertas gracias al sensor de luz y estimación de los tiempos de descanso del conductor. La gran diferencia detectada en los valores medios y variabilidad de los parámetros ambientales tanto en el producto como en la carga refrenda la necesidad de una supervisión distribuida de la carga y en su caso un actuación diferencial del equipo de frio en distintas zonas.

Agradecimientos

A la empresa HORTAMIRA S. COOP., especialmente a Jose Luis Satoca. Al proyecto de investigación SMARTQC financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y al programa TAGRALIA financiado por la Comunidad de Madrid.

5. Bibliografía

ASABE Standards, 2006. Psychrometric data ASAE D271.2 APR1979, R2005. St. Joseph, MI. Available in www.asabe.org, [January 2007].

Baggio, A., Wireless sensor networks in precision agriculture. In Workshop on Real-World Wireless Sensor Networks. REALWSN'05, Sweden, 2005.

Haneveld, P.K. Evading Murphy: A sensor network deployment in precision agriculture; June 28, 2007

Ipema, A.H., Goense, D., Hogewerf P. H., Houwers H. W. J., Van Roest, H., 2008. Pilot study to monitor body temperature of dairy cows with a rumen bolus. *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 64, Issue 1, November 2008, Pages 49-52.

Jedermann, R., Behrens, C, Laur R, Lang, W., 2007. Intelligent containers and sensor networks, Approaches to apply autonomous cooperation on systems with limited resources. Hülsmann, M.; Windt, K. (eds.): *Understanding Autonomous Cooperation & Control in Logistics – The Impact on Management, Information and Communication and Material Flow*. Springer, Berlin, 2007.

Nadimi, E.S., Søgaard, H.T., Bak, T., Oudshoorn, F.W., 2008a. ZigBee-based wireless sensor networks for monitoring animal presence and pasture time in a strip of new grass. *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 61, Issue 2, May 2008, Pages 79-87.

Nadimi, E.S., Søgaard, H.T., Bak, T., 2008b. ZigBee-based wireless sensor networks for classifying the behaviour of a herd of animals using classification trees. *Biosystems Engineering*, Issue 3, August 2008, Pages 405-415.

Qingshan S., Ying L., Gareth D., Brown D., 2004. Wireless Intelligent Sensor Networks for Refrigerated Vehicle. *IEEE 6th Symp. on Emerging Technologies: Mobile and Wireless Communication*. Shangai, China.

Ruiz-Garcia, L., Barreiro, P., Robla, J. I., 2008. Performance of ZigBee-Based Wireless Sensor Nodes for Real-Time Monitoring of fruit Logistics. *Journal of Food Engineering*. Volume 87, Issue 3, Pages 405-415.

Wang, N., Zhang, N., Wang, M., 2006. Wireless sensors in agriculture and food industry – Recent development and future perspective. *Computer and Electronics in Agriculture*, Volume 50, Issue 1, January 2006, Pages 1-14.