

Sistemas de Control en el Transporte de productos Perecederos

Ruiz-García, L.^{(1)*}; Barreiro, P.⁽¹⁾; Ruiz-Altisent, M.⁽¹⁾

⁽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

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, siendo el mayor reto asegurar una cadena de frío continua desde el productor hasta el consumidor. Entre las diferentes tecnologías que se pueden utilizar para monitorizar, destacan las tecnologías de sensórica inalámbrica que pueden ser de dos tipos: RFID (Identificación por Radio Frecuencia) y WSN (Redes inalámbricas de Sensores), por su gran potencial.

La tecnología RFID fue desarrollada para identificar de forma inalámbrica todo tipo de elementos, desde libros, hasta vehículos o contenedores de transporte. En la actualidad, se dispone de nuevos dispositivos RFID, de reducido tamaño, con sensores de temperatura embebidos lo cual permite registrar temperaturas a lo largo de toda la cadena de frío sin necesidad de cablear o realizar instalaciones adicionales.

Las WSN proporcionan una información más completa, pues a parte de temperatura miden también humedad, presión, luminosidad o aceleración. Además, son capaces de conformar topologías de red avanzadas y pueden funcionar de forma autónoma durante años.

Abstract

Perishable food products such as vegetables, fruit, meat or fish require refrigerated transportation are at risk of suffering various damages along the cold chain. Quality control and monitoring of products during transport and distribution is very important, being the biggest challenge to ensure a continuous cold chain from producer to consumer. The paper focuses on WSN (Wireless Sensor Networks) and RFID (Radio Frequency Identification), presenting the different systems available, recent developments and examples of applications

RFID was developed for the identification of any type of items, from books, to vehicles or containers. Nowadays, the technology has evolved to a new generation of RFID devices with temperature sensors which make possible to control the temperatures along the cold chain with using cable or install additional equipments.

WSN provide more detailed information, because apart from temperature it can measure relative humidity, pressure, light and acceleration. Moreover they are able to configure advanced network topologies and work for years without replacing batteries.

Palabras clave: Redes inalámbricas, sensores, RFID, transporte, logística.

Keywords: wireless sensor networks, RFID, transportation, logistics, cold chain.

1. Introducción

Los productos alimentarios perecederos tales como hortalizas, frutas, carne o pescado requieren transporte refrigerado. A lo largo de la cadena de frío estos productos están sometidos a un riesgo de pérdida de valor comercial, que se relacionan con descontrol en el tiempo, la temperatura, la humedad y los procesos relacionados con el avance hacia la senescencia y el desarrollo de podredumbres. El control de la calidad y supervisión de los productos durante su transporte y distribución es de gran importancia, siendo el mayor reto asegurar una cadena de frío continua desde el productor hasta el consumidor. Entre los diferentes trabajos que se han hecho sobre el transporte de frutas y hortalizas destacan los de Timm et al., (1998) y Bollen et al., (2000) que estudiaron los daños que se producían en manzanas durante el transporte, encontrando rangos de entre 15 y el 47.5% de fruta dañada [1, 2]. Roy et al., (2006) analizó la cadena de suministro de tomate fresco en Japón, cuantificando pérdidas del 5% del producto durante su transporte y distribución. Tanner y Amos (2003) demostraron que en el interior de un contenedor de transporte internacional pueden producirse gradientes de 7 a 9 °C de temperatura en el aire del contenedor, y de 4 a 6 °C dentro de los palets existiendo zonas fuera de especificación durante más del 70% de la duración del trayecto [3].

Frente a esta problemática, las soluciones comerciales no proporcionan información completa sobre la variabilidad de las condiciones a que se ve sometida la carga, debido a que las medidas se realizan en un punto, o en un número muy limitado de ellos. Para saber lo que está ocurriendo en el interior del transporte, es necesario realizar mediciones en diferentes puntos, obteniendo así un sistema de supervisión distribuido [4, 5].

Tanto las empresas como la administración pública necesitan mejorar las técnicas y métodos de monitorización, seguimiento y control de la trazabilidad, para garantizar la calidad de los productos.

Estudios recientes coinciden en destacar varias tecnologías emergentes como las más apropiadas para monitorizar la cadena de frío agroalimentaria. Estas tecnologías son: Identificación por Radio Frecuencia (*Radio Frequency Identifiers*, RFID), Redes Inalámbricas de Sensores (*Wireless Sensor Networks*, WSN), Sistemas de Posicionamiento GNSS (*Global Navigation Satellite System*) y Redes de Telecomunicación Global (*World Wide Area*

Networks, WWAN). RFID y WSN se encuentran en una fase más temprana de desarrollo, y son en las que se centra nuestro estudio, en contraposición con GNSS y WWAN de extendido uso en los sistemas de navegación y gestión de flotas [5-7].

El objetivo de esta ponencia es dar a conocer las últimas investigaciones realizadas en este campo, así como la situación actual de estos sistemas en el ámbito de la logística de productos perecederos alimentarios, centrándose en los trabajos realizados por el grupo de investigación Laboratorio de Propiedades Físicas y Tecnologías Avanzadas en Agroalimentación (LPFTAG, www.lpftag.upm.es) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

2. Sistemas RFID

RFID es una tecnología emergente que utiliza comunicación inalámbrica. Fue desarrollada para identificar de forma inalámbrica todo tipo de elementos, desde libros en los centros comerciales, hasta vehículos o contenedores de transporte intermodal. Se conocen también con el nombre de “tarjetas inteligentes” y tienen la capacidad de atravesar ciertos objetos, lo que le permite transmitir información entre dispositivos que no se ven mutuamente. La combinación de estas dos capacidades, identificar y comunicar sin necesidad de cables, ha extendido su uso en la logística agroalimentaria en aplicaciones que van desde la identificación de bienes en la recepción de almacén, la gestión de stocks, control de envíos o seguimiento de pedidos[8-11]. Todo ello a distintos niveles, pues posible identificar de forma individual según la aplicación, a nivel de vehículo, pallet, caja o elemento. Las razones de esta adopción generalizada están en los beneficios derivados de la automatización de procesos, pues estos sistemas permiten una mayor eficiencia en las operaciones, reduciendo los errores.

Su aplicación en el control de la cadena de frío ha sido posible gracias al desarrollo de nuevos dispositivos instrumentados con sensores de temperatura. Actualmente existen a nivel comercial tarjetas RFID con sensores de temperatura, tanto activas, como semi-pasivas. Con ellas es posible registrar temperaturas a lo largo de toda la cadena de frío sin necesidad de cablear o realizar instalaciones adicionales [12, 13].

Controlar la temperatura durante el transporte es fundamental, pero también son importantes otros parámetros como la humedad relativa o la concentración de gases. Estos equipos se encuentran en una fase avanzada de desarrollo, por lo que en un futuro próximo se espera contar con nuevos RFIDs que incorporen sensores para medir humedad [14, 15], aceleración [16], luz [15, 17], pH [18] y concentración de gases como el acetaldehído o el etileno [19].



Figura 1: Tarjeta RFID semi-pasiva con sensor de temperatura (fuente: Sealed Air).

Dentro de la tecnología RFID, existen distintos tipos de tarjetas, desde las que utilizan la parte baja del espectro (125 KHz) hasta las que hacen uso de frecuencia súper alta (*Super High Frequency*, SHF) a 5.875 GHz. Las que operan a mayor frecuencia permiten un mayor alcance y velocidad de transmisión de datos (véase tabla1). En general, una frecuencia menor significa un alcance de lectura menor, menor transferencia de datos, pero mayor capacidad para realizar lecturas cerca o sobre superficies metálicas o líquidas que pueda producir interferencias.

Tabla 1: Tipos de RFID según su frecuencia de funcionamiento

	Frecuencia	Alcance	Velocidad de transferencia de datos
Baja frecuencia (LF)	30-300KHz	0.1 - 1.5m	1-10KB/s
Alta frecuencia (HF)	3-30MHz	0.1 - 0.7m	1-3KB/s*
Muy alta frecuencia (VHF)	30-300MHz	1-3m	1-20KB/s
Ultra alta frecuencia (UHF)	300-3000MHz	1-3m	1KB-10MB/s
Super alta frecuencia (SHF)	3-30 GHz	1-100m	1KB-10+MB/s

Un sistema RFID está compuesto por tres elementos clave: la tarjeta, el lector que lee y escribe datos en la tarjeta, y el ordenador, que contiene la base de datos y el software que la gestiona. Según el comportamiento de estos elementos, los sistemas RFID pueden ser clasificados en activos, pasivos o semi-pasivos (o semi-activos). Las tarjetas pasivas no disponen de ninguna fuente de alimentación interna, sólo se activan cuando un lector les suministra la energía necesaria para enviar una respuesta. En el caso de las semi-pasivas la batería solo se utiliza para suministrar energía al sensor y al hardware que guarda datos registrados. Las tarjetas activas disponen de su propia batería, que utilizan para alimentar sus componentes y enviar la señal al lector.

En el ámbito de la logística del frío, las más utilizadas han sido las tarjetas semi-pasivas por su mayor duración de batería. Uno de los primeros trabajos con estos dispositivos fue realizado por investigadores de la Universidad de Bremen (Alemania) en el que también participaron investigadores del LPFTAG de la UPM. Las tarjetas semi-pasivas se utilizaron para supervisar transportes frigoríficos de alimentos a corta distancia. Como primer paso se realizó un estudio comparativo de tres sistemas RFID, lo cual permitió seleccionar aquel que tenía las mejores prestaciones, en cuanto a precisión ($\sigma=0.25^{\circ}\text{C}$) y capacidad de registro de datos (702 medidas). A continuación, se instalaron 48 de estos dispositivos en un pallet, para estudiar la distribución de temperaturas, simulando condiciones normales en la cadena de frío (véase figura 2). Finalmente, se monitorizaron 15 camiones frigoríficos compartimentados, a diferentes temperaturas de consigna, incluyendo transportes de productos ultracongelados (véase figura 3).

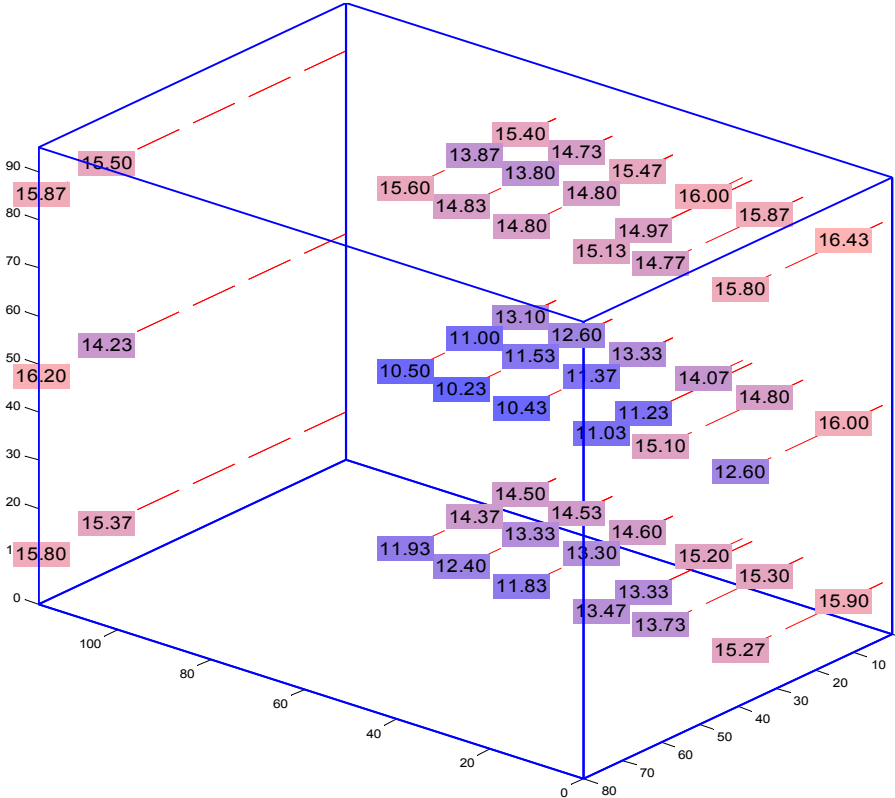


Figura 2: Distribución de temperaturas en el interior de un pallet durante un periodo de ruptura de la cadena de frío.

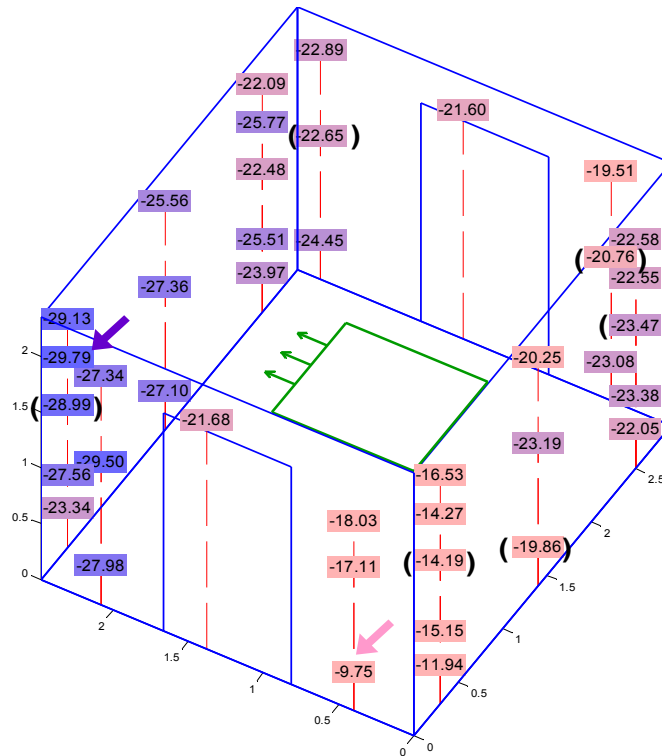


Figura 3: Distribución de temperaturas en el interior de un camión frigorífico durante el transporte de productos ultracongelados.

A partir de los datos obtenidos fue posible detectar gradientes de temperatura en función de la distancia al equipo de frío, cuantificar las desviaciones respecto de la temperatura de consigna de hasta 12 °C y estimar el número mínimo de sensores que son necesarios para una monitorización fiable en camiones frigoríficos, reduciendo en un 30% el número de sensores iniciales. La utilización de un modelo de predicción de la calidad que tiene en cuenta las variaciones de temperatura durante el transporte y distribución, permitió estimar la vida útil de los productos, en distintas condiciones de la cadena de frío consiguiéndose incrementos de hasta el 20 %. De esta manera, los dispositivos utilizados se mostraron muy útiles en la optimización de la distribución de alimentos, detectando puntos débiles y suministrando información valiosa para las empresas implicadas en la cadena de frío [12].

Los RFIDs semi-pasivos también han sido empleados en la monitorización de transportes frigoríficos internacionales. Amador et al. 2009 realizó un estudio comparando las prestaciones de distintos RFIDs semipasivos y otros módulos convencionales, en el control de temperatura en pallets cargados con piñas [13]. En esta aplicación, las principales ventajas de los RFID fueron la facilidad de manejo, instalación, configuración y lectura frente a los dispositivos convencionales, los RFID requieren menos tiempo para el usuario por lo cual suponen un ahorro en mano de obra y aceleran las operaciones de control en las centrales hortofrutícolas.

El comportamiento de sistemas RFID en contenedores frigoríficos de transporte intermodal fue investigado por Laniel et al. (2008). Su investigación se centro en la comparación de diferentes frecuencias y configuraciones en el interior de un contenedor de 12m (40'). Tres frecuencias distintas fueron estudiadas: 2.4 GHz, 915 MHz y 433 MHz, midiendo su atenuación a la mitad y al principio del contenedor. Los resultados mostraron que la frecuencia mas idónea era 433 MHz con atenuaciones medias de 19.57% (zona central) y 18.20% (zona frontal) [20].

3. Redes inalámbricas de Sensores

Una red inalámbrica de sensores (*Wireless Sensor Networks*, WSN) es un conjunto de “motes” o nodos que son capaces de medir determinadas variables del entorno y transmitir estos datos de forma inalámbrica (sin cables) hasta una estación base donde los datos son almacenados. Los avances en microelectrónica han permitido el desarrollo de nodos multifuncionales de bajo costo, reducido tamaño y elevada autonomía, gracias a su bajo consumo energético [21, 22].

Las redes inalámbricas de sensores son una tecnología prometedora en el campo de los sistemas de transporte inteligente. Las WSN proporcionan una información más completa que los RFID, pues junto con los sensores de temperatura llevan otros para medir humedad, presión, luminosidad o aceleración. Otra gran ventaja son las topologías de red que pueden utilizar, como las redes en forma de malla que se adaptan automáticamente a la presencia de nuevos obstáculos gracias a su comunicación “multihop”.

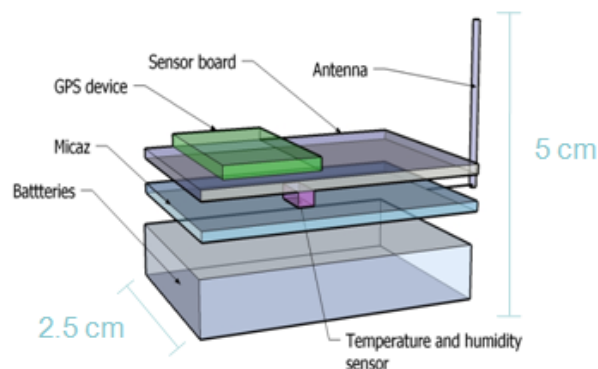


Figura 4: Mote ZigBee

Dentro de las tecnologías disponibles para estas redes, el protocolo de transmisión inalámbrica que se muestra más apropiado es ZigBee; debido a que opera en frecuencias libres y a su tasa de transferencia de datos [6, 7]. El uso de motes ZigBee (véase figura 4) en ambientes refrigerados ha sido validado mediante la experimentación en almacenes frigoríficos de mayoristas de frutas y hortalizas. Bajo condiciones propias de transporte frigorífico (0.0 °C y 90% HR), se ha observado que el tiempo de duración de las baterías se reduce significativamente, siendo la mitad de la duración a 0° que ha 20°. Aún así con los

algoritmos de programación actualmente en funcionamiento se ha comprobado que los motes ZigBee pueden estar funcionando con 2 pilas de 1.5 V tipo AA durante más de 3 meses, de forma completamente autónoma. También se ha visto que cuando las baterías tenían un voltaje de entre 2159-2167 mV comenzaban aparecer datos erróneos, la temperatura aumentaba enormemente y tanto la temperatura como la humedad relativa incrementaban notablemente su variabilidad (véase figura 5) [23].

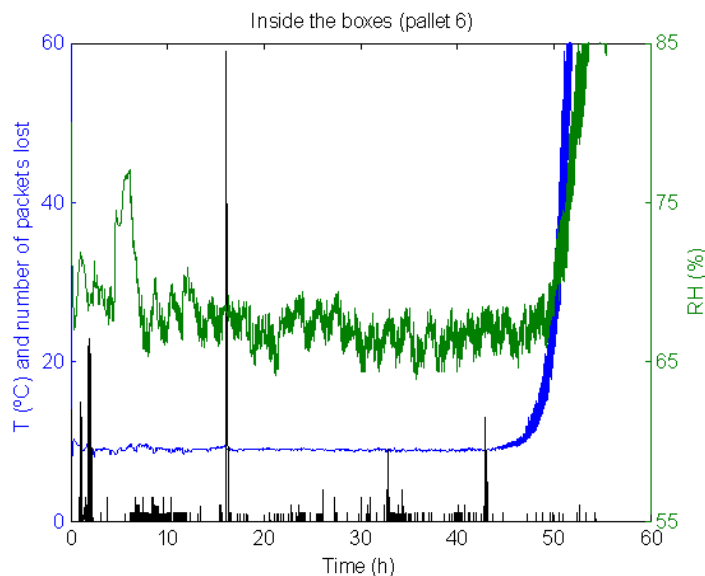


Figura 5: Humedad relativa (%), temperatura (°C) y distribución de paquetes perdidos

Un aspecto fundamental a la hora de aplicar las WSN es la fiabilidad de la transmisión, es imprescindible calcular los porcentajes de paquetes perdidos, es decir, datos que fueron enviados pero que no llegaron a su destino. Su distribución y cantidad total debe ser lo menor posible para que no se pierda información útil sobre el estado de la carga. El problema de los motes ZigBee, es que la frecuencia que la mayoría de ellos utilizan, coincide con la frecuencia de resonancia del agua (2.4GHz), lo cual supone un problema para atravesar medios que tengan un gran contenido en agua como son las frutas y hortalizas, y su ambiente inmediato/circundante. Si se opta por estos motes, la solución para evitar que el porcentaje de paquetes se excesivo, pasa por utilizar motes con mayor potencia de radio frecuencia e incrementar el número de motes en la red [24].

Se han realizado estudios preliminares para la implementación de WSN en transportes internacionales de hortalizas en camiones frigoríficos. Los motes utilizados han proporcionado información relevante sobre temperatura, humedad relativa, presión, luz y aceleración en el interior del transporte. En cuanto a las condiciones de temperatura y humedad durante el trayecto se vio que la carga estuvo fuera de las condiciones óptimas durante la práctica totalidad del trayecto (98%). Los datos de luz permitieron estimar la apertura y cierre de las puertas del tráiler (véase figura 6). Los sensores de aceleración dentro de la carga permiten

monitorizar el rango de vibraciones que soporta el producto (ver figura 7), así como también extraer otra información como por ejemplo ver cuando el camión está en marcha y cuando está parado (ver figura 7).

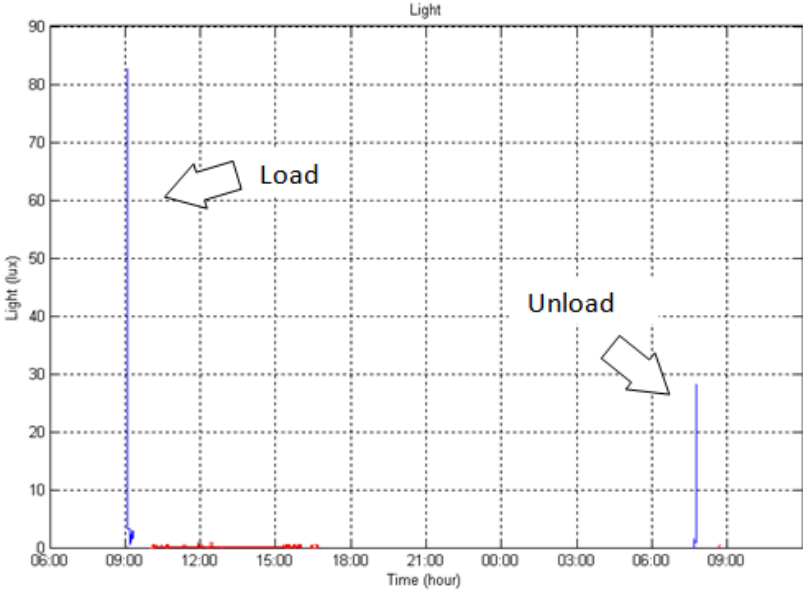


Figura 6: Medidas de luz durante el trayecto del camión

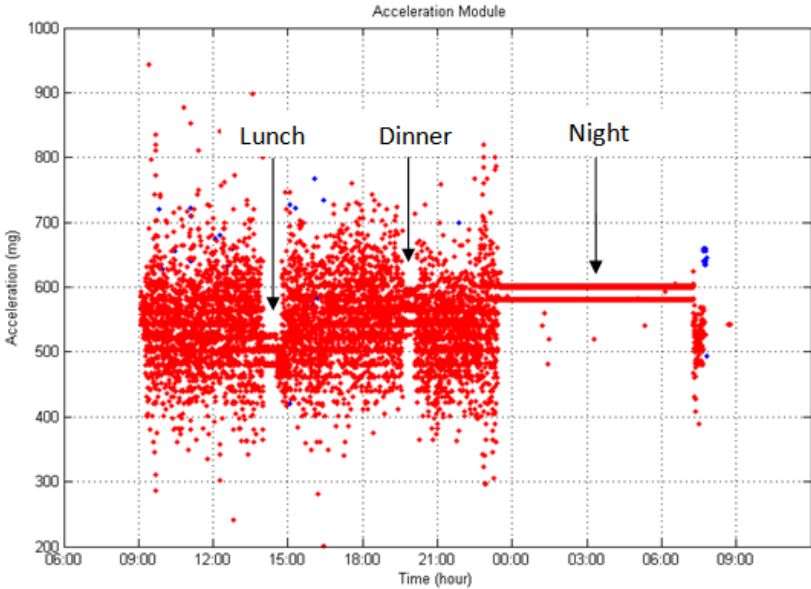


Figura 7: Datos de aceleración obtenidos con WSN

Además, con los datos de presión, temperatura y humedad, y basándonos en el modelo psicrométrico ASAE D271.2 se ha determinado la humedad absoluta y elaborado el diagrama psicrométrico (ver figura 8) [25].

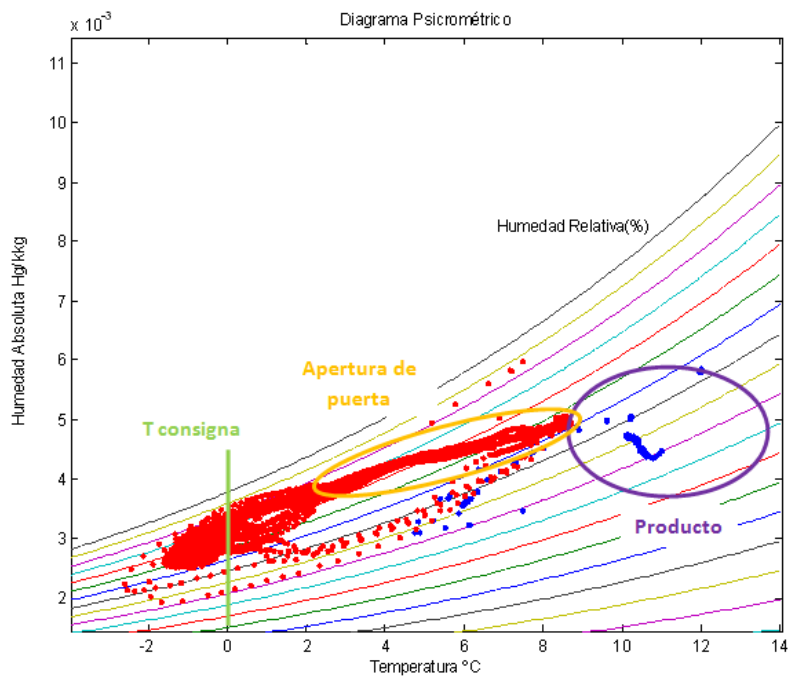


Figura 8: Diagrama psicrométrico

4. Conclusiones

RFID y WSN son dos tecnologías que van a tener un papel determinante en el control de transportes de productos perecederos. Los dispositivos RFID se utilizan más, pues son más sencillos, baratos, fáciles de configurar y están más desarrollados que los motes de las WSN. Los experimentos realizados con WSN demuestran que es una tecnología muy prometedora y con gran potencial, capaz de suministrar información detallada y diversa sobre las condiciones en que se realizan los transportes.

Dentro de la carga también sería muy interesante medir concentración de CO₂, etileno, etanol y otros compuestos volátiles. Sin embargo, estos sensores todavía no han sido desarrollados en forma miniaturizada (imprescindible para minimizar el consumo de batería) para que puedan integrarse adecuadamente en sistemas RFID o WSN.

Los modelos de predicción de la vida útil basados en la temperatura son útiles y se pueden implementar fácilmente con los dispositivos disponibles. Sin embargo, la información que proporcionan no es completa y la obtención de modelos avanzados de predicción de la calidad durante el transporte se hace necesaria y pasa por la incorporación a dichos modelos de otros factores relacionados con la calidad postcosecha de los productos hortofrutícolas como por ejemplo la humedad, el estado del producto en la recolección, etc.

Agradecimientos

Al proyecto de investigación SMARTQC (GL2008-05267-C03-03/ALI) financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, al programa TAGRALIA (Ref.: S-0505/AGR-0187) financiado por la Comunidad de Madrid y a la red FRUTURA financiada por CYTED.

Bibliografía

- [1] E. J. Timm, A. F. Bollen, D. R. B. T., and I. M. Woodhead, "Apple damage and compressive forces in bulk bins during orchard transport," *Applied Engineering in Agriculture*, vol. 14, pp. 165-172, 1998.
- [2] A. F. Bollen, E. J. Timm, and B. T. De la Rue, "Relation of individual forces on apples and bruising during orchard transport of bulk bins," *Food & Process Engineering*, vol. 17, pp. 193-200, 2000.
- [3] D. J. Tanner and N. D. Amos, "Heat and Mass Transfer - Temperature Variability during Shipment of Fresh Produce," *Acta Horticulturae*, vol. 599, pp. 193-204, 2003.
- [4] J. Rodríguez-Bermejo, P. Barreiro, J. I. Robla, and L. Ruiz-Garcia, "Thermal study of a transport container," *Journal of Food Engineering*, vol. 80, pp. 517-527, 2007.
- [5] L. Ruiz-Garcia, P. Barreiro, J. Rodríguez-Bermejo, and J. I. Robla, "Monitoring intermodal refrigerated fruit transport using sensor networks: a review," *Spanish Journal of Agricultural Research*, vol. 5, 2007.
- [6] R. Jedermann, C. Behrens, D. Westphal, and W. Lang, "Applying autonomous sensor systems in logistics - Combining sensor networks, RFIDs and software agents," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 132, pp. 370-375., 2006.
- [7] S. Qingshan, L. Ying, D. Gareth, and D. Brown, "Wireless Intelligent Sensor Networks for Refrigerated Vehicle," in *IEEE 6th Symposium on Emerging Technologies Mobile and Wireless Communication* Shanghai, China, 2004.
- [8] R. Angeles, "RFID technologies: Supply-chain applications and implementation issues," *Information Systems Management*, vol. 22, pp. 51-65, 2005.
- [9] D. C. Twist, "The Impact of Radio Frequency Identification on Supply Chain Facilities," *Journal of Facilities Management*, vol. 3, pp. 226-239, 2005.
- [10] M. Attaran, "RFID: an enabler of supply chain operations," *Supply Chain Management-an International Journal*, vol. 12, pp. 249-257, 2007.
- [11] E. Ngai and F. Riggins, "RFID: Technology, applications, and impact on business operations," *International Journal of Production Economics*, vol. 112, pp. 507-509, 2008.
- [12] R. Jedermann, L. Ruiz-Garcia, and W. Lang, "Spatial temperature profiling by semi-passive RFID loggers for perishable food transportation," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 65, pp. 145-154, Mar 2009.
- [13] C. Amador, J. P. Emond, and M. C. Nunes, "Application of RFID Technologies in the Temperature Mapping of the Pineapple Supply Chain," in *Food Processing Automation Conference* Providence, Rhode Island (USA), 2008.
- [14] K. Chang, Y. H. Kim, Y. Kim, and Y. J. Yoon, "Functional antenna integrated with relative humidity sensor using synthesised polyimide for passive RFID sensing," *Electronics Letters*, vol. 43, pp. 259-260, 2007.
- [15] E. Abad, F. Palacio, M. Nuin, A. González de Zárate, A. Juarros, J. M. Gómez, and S. Marco, "RFID smart tag for traceability and cold chain monitoring of foods: Demonstration in an intercontinental fresh fish logistic chain," *Journal of Food Engineering*, vol. In press, 2009.
- [16] B. Todd, M. Phillips, S. M. Schultz, A. R. Hawkins, and B. D. Jensen, " Low-Cost RFID Threshold Shock Sensors," *IEEE Sensors Journal*, vol. 9, pp. 464-469, 2009.
- [17] N. Cho, S. J. Song, S. Kim, and H. J. Yoo, "A 5.1-mu W UHF RFID tag chip integrated with sensors for wireless environmental monitoring," *Esscirc 2005: Proceedings of the 31st European Solid-State Circuits Conference*, pp. 279-282, 2005.
- [18] I. Murković and M. D. Steinberg, "Radio Frequency tag with optoelectronic interface for distributed wireless chemical and biological sensor applications," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. In press, 2009.
- [19] A. Vergara, E. Llobet, J. L. Ramírez, P. Ivanov, L. Fonseca, S. Zampolli, A. Scorzoni, T. Becker, S. Marco, and J. Wöllenstein, "An RFID reader with onboard sensing capability for monitoring fruit quality," in *Euroensors 2006* Goteborg, Sweden, 2006.

- [20] M. Laniel, J. P. Emond, and A. E. Altunbas, "RFID Behavior Study in Enclosed Trailer/Container for Real Time Temperature Tracking," in *Food Processing Automation Conference* Providence, Rhode Island (USA), 2008.
- [21] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Computer Networks*, vol. 38, pp. PII S1389-1286(01)00302-4, 2002.
- [22] E. H. Callaway, *Wireless Sensor Networks: architectures and protocols*: Auerbach Publications, 2004.
- [23] L. Ruiz-Garcia, P. Barreiro, and J. I. Robla, "Performance of ZigBee-based wireless sensor nodes for real-time monitoring of fruit logistics," *Journal of Food Engineering*, vol. 87, pp. 405-415, 2008.
- [24] L. Ruiz-Garcia, "Development of Monitoring Applications for Refrigerated Perishable Goods Transportation," in *Ingenieria Rural*. vol. PhD Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2008.
- [25] A. Standards, "Psychrometric data ASAE D271.2 APR1979, R2005," St. Joseph, MI, 2006.