

SUPERVISIÓN MULTIDISTRIBUIDA DE TRANSPORTES INTERNACIONALES DE FRUTAS Y HORTALIZAS

**LUIS RUIZ-GARCIA⁽¹⁾, PILAR BARREIRO⁽¹⁾, JOSÉ RODRÍGUEZ-BERMEJO⁽²⁾ y
JOSE IGNACIO ROBLA⁽²⁾**

⁽¹⁾ Laboratorio de Propiedades Físicas y Técnicas Avanzadas en Agroalimentación (LPF-TAG). ETSI Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid. Avda. Complutense, s/n, 28040, Madrid, España, luis.ruiz@upm.es, +34-913365862

⁽²⁾ Laboratorio de Tecnología de Sensores (LTS). Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM-CSIC). Avda. Gregorio del Amo, 8, 28040, Madrid, España, +34-915538900 ext. 312

Palabras clave: monitorizar - redes inalámbricas de sensores - contenedores

RESUMEN

La supervisión de los transportes de productos perecederos es fundamental para garantizar su calidad de cara al consumidor. A lo largo del transporte estos productos están sometidos a un riesgo de pérdida de valor comercial, que se relaciona con descontroles en el tiempo, la temperatura, la humedad y los procesos de avance hacia la senescencia y el desarrollo de podredumbres. Actualmente, las soluciones comerciales disponibles en el mercado 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.

Existen sensores susceptibles de ser montados de forma multidistribuida en contenedores de transporte internacional. La información aportada por los sensores puede ser empleada en tiempo real por otros dispositivos de control electrónico, como el que gestiona el equipo de frío. Los avances técnicos en redes de comunicación digital permiten monitorizar las unidades de transporte en tiempo real, de forma individual.

Nuestro equipo investigador ha abordado el trabajo experimental desde varios puntos de vista: evaluación de tecnologías sensoras para la determinación de compuestos volátiles, caracterización térmica de los contenedores de transporte intermodal, análisis del comportamiento termodinámico de los equipos de frío, y actualmente se están realizando pruebas para implementar una red inalámbrica de sensores en el interior de un contenedor frigorífico. A partir de los resultados de estos ensayos se han definido los componentes y especificaciones del sistema que se presenta en esta comunicación.

MULTIDISTRIBUTED MONITORING SYSTEM FOR INTERNATIONAL FRUIT TRANSPORT

Key Words: monitoring - wireless sensor networks – containers

ABSTRACT

Monitoring perishable goods transports is fundamental in order to guarantee their quality for consumers. Fruits & vegetables suffer different risks along their transport along the supply chain, so that material and quality losses occur. This risk is related to lack of appropriate monitoring and control of time, temperature and humidity, and causes senescence

and rots. Commercial solutions available in the market usually do not provide complete information about the conditions during the transport, because they measure in just one point or in few points. The integration of emergent information technologies can provide real-time status updates. This paper presents a multidistributed monitoring system for refrigerated transports integrating various emergent technologies. Also it defines the specifications and the components of the system gathering different sensors and electronic modules.

INTRODUCCIÓN

La Unión Europea se ha consolidado como la primera región importadora de productos agrícolas y es la segunda mayor región exportadora, por detrás de Estados Unidos. La producción anual europea alcanza los 40 y 66 millones de toneladas de frutas y hortalizas, respectivamente, siendo los principales productores Italia, España y Francia. Del total producido por la Unión Europea se exportan casi 4 millones de toneladas de frutas frescas y 1.5 millones de toneladas de hortalizas (FAOSTAT, 2007).

A lo largo de su transporte estos productos están sometidos a un riesgo de pérdida de valor comercial, que se relacionan con descontroles en el tiempo, la temperatura, la humedad y los procesos relacionados con el avance hacia la senescencia y el desarrollo de podredumbres. Tanner y Amos (2003) han demostrado 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.

Por tanto, para asegurar la calidad de las frutas durante su transporte es necesario realizar una supervisión de los principales indicadores, tanto del estado de la carga, como de funcionamiento del equipo de frío. Actualmente, las soluciones comerciales disponibles en el mercado 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 contenedor, es necesario realizar mediciones en diferentes puntos, obteniendo así un sistema de supervisión multidistribuido (Rodríguez-Bermejo et al., 2006; Ruiz-García et al., 2007).

Por otro lado, también es necesario tener en cuenta la legislación vigente en materia de trazabilidad. En la UE (Unión Europea) los requisitos sobre trazabilidad (en vigor desde el 1 de Enero del 2005), son exigibles a todos los operadores de la cadena agroalimentaria. Todos los intermediarios deben registrar y guardar información como: 1) Nombre y dirección del proveedor, naturaleza de los productos recibidos, así como 2) Nombre y dirección del cliente, naturaleza de los productos suministrados y 3) Fecha de la transacción. También, hay una serie de datos que se recomiendan almacenar: volumen o cantidad, número de lote, descripción detallada del producto (empaquetado, a granel, en el caso de frutas la variedad comercial, si el producto está crudo o procesado). Y los importadores deben identificar al productor y al país de origen (EC, 2002 y 2004).

Las tecnologías de la información permiten integrar información relativa a la trazabilidad del producto, junto con datos relacionados con la monitorización del transporte. En la actualidad existen sistemas de monitorización remota para contenedores frigoríficos, estandarizados en la norma ISO 10368. En la transmisión con cables suelen surgir problemas de compatibilidad entre los componentes del sistema, por lo que es de esperar que sean sustituidos por procedimientos de transmisión inalámbrica en un futuro cercano (ISO 10368, 1992; GDV, 2005).

En cuanto a las comunicaciones, en los últimos años se han llevado a cabo investigaciones a nivel internacional en el ámbito de lo que se ha venido a llamar sistemas de

transporte inteligente. Estos estudios coinciden en proponer el uso de varias tecnologías emergentes como 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) para la monitorización de contenedores de transporte intermodal (Akyildiz et al., 2002; Qingshan et al., 2004; Jedermann et al., 2006; Ruiz-Garcia et al., 2007).

Un sistema que integre estas tecnologías puede informar en tiempo real del estado de la carga y realizar un seguimiento de los productos a lo largo de la cadena agroalimentaria. Este artículo muestra los resultados más relevantes alcanzados en un Proyecto CICYT (Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología) denominado SENSOFRIGO.

OBJETIVOS

Este trabajo propone las especificaciones de un sistema multidistribuido para la supervisión de transportes internacionales de frutas y hortalizas. El sistema debe ser capaz de proporcionar información completa en tiempo real sobre el estado de los productos transportados y proporcionar a todos los operadores la información necesaria para cumplir con los requisitos de trazabilidad vigentes.

TRABAJO EXPERIMENTAL

La supervisión multidistribuida de la carga en transportes internacionales ha sido abordada desde varios puntos de vista: 1) evaluación de tecnologías para la determinación de compuestos volátiles (Ruiz-Garcia et al., 2006); 2) caracterización de térmica de contenedores de transporte (Rodríguez-Bermejo et al., 2006); 3) análisis del comportamiento termodinámico del equipo de frío de un contenedor (Rodríguez-Bermejo et al., 2007) y actualmente se están realizando pruebas con sistemas de comunicación inalámbrica.

1) Evaluación de tecnologías sensoras

Los trabajos sobre sensores para la detección y medida de compuestos volátiles en transportes de frutas se han centrado en la aplicación de microespectrofotómetros de infrarrojos con filtros lineales variables, conocidos por su acrónimo en inglés LVF-IR (Lineal Variable Filter - Infra Red). Estos sensores, de reducido tamaño (ver Figura 1), aptos para la detección de etileno, etanol y CO₂, disponen una delgada lamina piroeléctrica dotada de una serie píxeles con una alta sensibilidad a los cambios de temperatura. Una capa especial de absorción asegura que la radiación incidente es transformada en cambios de temperatura medibles. Se han aplicado dos sensores LVF-IR en estos experimentos, que se corresponden con dos rangos distintos: 2.9-4.8 μm (3448-2083 cm^{-1}) para CO₂ y CO, mientras que 9.0-11.0 μm (1111-909 cm^{-1}) para etileno y etanol. Como técnicas de referencia se han utilizado un cromatógrafo de gases y sensores comerciales para la detección de etileno y etanol de tipo resistivo (International Sensor Technology, IST Ltd.) (Giberti et al., 2004).



Figura 1: Tamaño relativo de un espectrofotómetro LVF-IR y Montaje experimental

Durante los ensayos se supervisó la evolución postrecolección de dos lotes de plátanos, a lo largo de 2, 7 y 9 días de vida en estantería, mientras que para caracterizar las muestras se utilizó espectrofotómetro visible (Minolta Inc.). Los resultados prueban la falta de especificidad de los sensores comerciales para etileno y etanol disponibles en el mercado, mientras que los sensores del tipo LVF-IR son capaces de distinguir ambos compuestos volátiles de manera efectiva. Este aspecto es fundamental, dado que el etileno es una hormona de maduración mientras que etanol es indicativo de la existencia de procesos respiratorios anormales, como por ejemplo, fermentación anaerobia (Ruiz-Garcia et al., 2006).

2) Caracterización térmica de contenedores de transporte

Se estudió un contenedor de tipo reefer de 20 pies de longitud, dividido en dos zonas. En el compartimento más pequeño, de dimensiones 2620x2184x2270 mm, y en el exterior del contenedor se instalaron sensores de temperatura resistivos (PT 100 de 4 hilos). Los experimentos consistieron en el registro de temperaturas tanto dentro como fuera del contenedor, para determinar la distribución de temperaturas bajo funcionamiento continuo y discontinuo. Las temperaturas de consigna fueron 0 °C y 6 °C, en combinación con dos tipos de carga: vacío y lleno. Por último, también se probaron dos frecuencias el desescarchado: cada 6 horas y automáticamente. Se probaron ocho diferentes configuraciones durante 3 ó 4 días (Rodríguez-Bermejo et al., 2006).

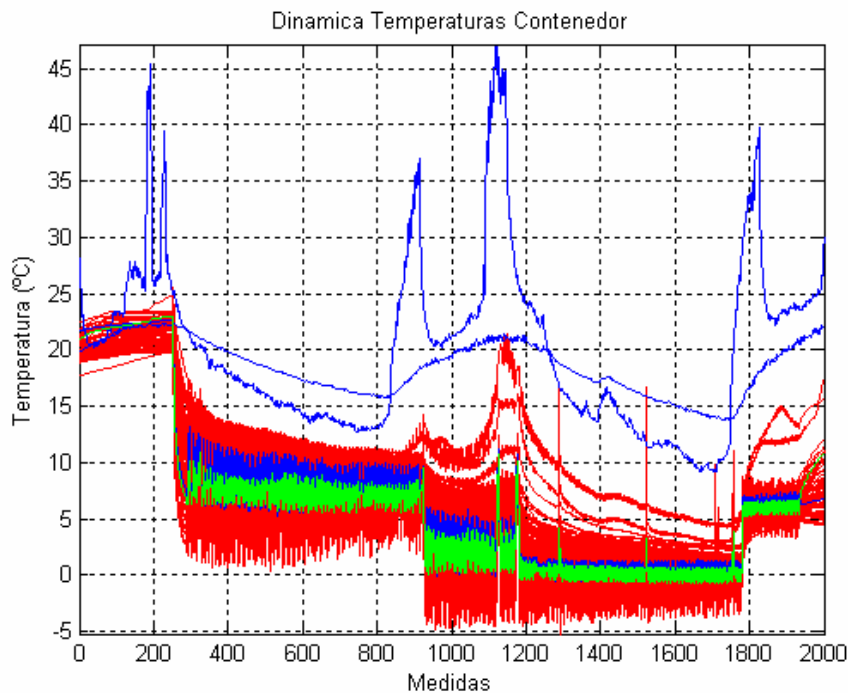


Figura 2: Dinámica de temperaturas durante uno de los ensayos con el contenedor

Como conclusiones más importantes destaca el hecho de que la diferencia entre la temperatura dentro del contenedor y la temperatura de consigna llega hasta el 30 % de la temperatura ambiente. El funcionamiento en modo continuo consigue una mayor homogeneidad en la refrigeración. En cambio, en modo discontinuo se registran diferencia de temperatura de hasta 8 °C en el interior del contenedor (Rodríguez-Bermejo et al., 2006).

Análisis del comportamiento termodinámico de un equipo de frío

A este efecto se ha instalado un conjunto de termopares en los distintos elementos del equipo de frío del mencionado contenedor tipo reefer 20: compresor, condensador, intercambiador de calor, evaporador, separador de líquido, así como sendos manómetros inalámbricos a la salida del compresor, del evaporador y del separador de líquido. Los resultados más relevantes (Rodríguez-Bermejo et al., 2007) indican que el ciclo termodinámico sufre grandes fluctuaciones a lo largo del día en las épocas estivales, existiendo un amplio margen para la mejora de la eficiencia energética de los circuitos de frío mediante pequeñas modificaciones: sustitución del regulador mecánico de la válvula térmica de expansión por un control electrónica, o empleo de evaporadores modulares que evitan la necesidad de interrumpir la generación de frío durante el desescarchado.

Redes inalámbricas de sensores

Según varios autores el estándar más apropiado para este tipo de redes es Zigbee, debido a su bajo consumo energético, a que opera en frecuencias libres y a su tasa de transferencia de datos (Akyildiz et al., 2002; Qingshan et al., 2004; Jedermann et al., 2006; Ruiz-Garcia et al., 2007). Empleando nodos que utilizan este protocolo de transmisión, se han estudiado dos aspectos que consideramos fundamentales: la duración de la batería y la fiabilidad de transmisión de los datos.

Bajo condiciones propias de transporte frigorífico (0.0 °C y 90% HR), se observado que los nodos pueden estar funcionando con baterías de 1.5 V durante más de 7 días (midiendo cada 10 segundos). El porcentaje medio de paquetes perdidos es inferior al 5%, por lo que podemos considerarlo un sistema de transmisión fiable.

Los experimentos de transmisión inalámbrica demuestran que este tipo de redes, son válidas en el ámbito de los transportes frigoríficos.

SISTEMA DE SUPERVISIÓN PROPUESTO

Partiendo de este trabajo experimental se han definido los componentes y las especificaciones de un sistema multidistribuido. Este sistema de supervisión está pensado para su uso en aplicaciones en tiempo real permitiendo la localización, seguimiento y gestión de las unidades de transporte. El contenedor se convierte en el objetivo de monitorización en lugar de la cabeza tractora del camión. De esta manera, el sistema de supervisión esta en el contenedor y optimizado para obtener la mayor información posible de fuentes externas, con el objetivo de racionalizar la cantidad de unidades sensoras instaladas.

Localización

La localización del transporte es proporcionada por el GNSS, que permite registrar los movimientos y la ruta de la carga. El sistema tiene que disparar una alerta si el transporte se desvía de la ruta prevista.

Redes de sensores

Para conocer el estado de la carga, en el caso de frutas y hortalizas, es necesario determinar las magnitudes a medir y los tipos de sensores a utilizar. Dentro de la carga es interesante medir la temperatura, humedad, punto de condensación, concentración de CO₂ y de etileno, etanol y otros compuestos volátiles.

Para determinar el funcionamiento del equipo de frío es importante medir la velocidad del aire en el interior del contenedor, la presión del fluido refrigerante en distintos puntos del circuito frigorífico, así como la temperatura del aire a la salida de los álabes del ventilador salida y en el punto de retorno.

La información aportada por los sensores puede ser empleada en tiempo real por otros dispositivos de control electrónico, como el que gestiona el equipo de frío.

En un sistema como el que se propone, se debe poner especial atención en el autodiagnóstico de los sensores y el pretratamiento de la señal, con el fin de reducir la cantidad de información transmitida. Los sensores pueden integrarse en una red inalámbrica bajo el protocolo Zigbee.

El sistema de supervisión no debe depender del equipo de frío ya que en caso de fallo eléctrico, el sistema de supervisión debe seguir funcionando. Un requisito clave para garantizar la autonomía del sistema, es lograr la mayor duración posible de las baterías, reduciendo el consumo de energía.

Tabla 1. Componentes del sistema de supervisión multidistribuido propuesto

| Componentes | Especificaciones | Referencias |
|--|--|--------------------------------------|
| Batería | Duración, tolerancia bajas temperaturas | Akyildiz et al., 2002; Qingshan 2004 |
| Composición de los nodos: Temperatura, HR, volátiles, presión atmosférica, punto de rocío, velocidad aire, localización, iluminación, precintos | Bajo coste Fidelidad de las medidas, adaptación a la norma EN 12380 | Ruiz-Garcia et al., 2007 |

| | | |
|--|--|--------------------------------|
| Localización nodos: Canales de aire, equipo de frio, carga | Accesibilidad de instalación y montaje. No interferencia con tareas de carga y descarga | Ruiz-Garcia et al., 2007 |
| Transmisión inalámbrica: WSN (Zigbee, RFID), WLAN (Wi-Fi, WIMAX), WWAN (GPRS, UMTS) | Alcance de transmisión, Inmunidad a interferencias electromagnéticas, Tolerancia altas densidades estiba | Jedermann et al., 2006 |
| Preprocesado señales, Algoritmos de control y gestión de alarmas | Necesidades de filtrado Fusión de datos y sensores Calculo de parámetros característicos y de control Umbrales de alarma | Craddock y Stansfield, 2005 |
| Buses de campo | CANbus. Adaptación a los estándares ISO11992, NMEA 2000 | ISO 11992, NMEA 2000 |
| Sistema de control de frio y desescarchado | Activación externa del compresor, inversor de ciclo y regulación de la válvula de expansión | Bermejo et al., 2007 |
| Sistema de renovación del aire | Adaptable a las condiciones exteriores de temperatura y humedad relativa | Tanner y Amos, 2003 |
| Gestión de flotas | Blindaje de bases de datos, Acceso en tiempo real, minería de datos | Giannopoulos, 2004 |

El uso de redes comunicación basadas en protocolos estandarizados permite la interoperabilidad del sistema. La ventaja de utilizar estándares es considerable, ya que permite el desarrollo independiente de componentes individuales de las redes. Otra ventaja es que permite a los fabricantes utilizar componentes de diferentes proveedores.

Red de Control de Área

La información proporcionada por los sensores debe ser procesada con el fin de comprobar que el estado de la carga este conforme a las condiciones de consigna. El tipo de red más apropiado para esta aplicación es la red de control de área (Control Area Network, CAN), del tipo CANbus (Ruiz-Garcia et al., 2005). En estas redes admiten la conexión de una gran variedad de sensores y actuadores. Los actuadores conectados al CANbus serán responsables del control de flujo de aire, la generación de frio y el desescarchado.

La construcción modular de las redes CAN permite incrementar el tamaño del sistema fácilmente. El objetivo es que los sistemas de transporte inteligente sean compatibles con los protocolos estandarizados SAEJ1939 e ISO11992. La unidad central de control electrónico funcionará como puerta de enlace entre los diferentes protocolos. El sistema propuesto debe permitir la interconexión de las diferentes subredes, así como el filtrado, y procesado de los mensajes de los sensores.

Acceso remoto

El sistema de supervisión debe permitir la consulta del estado del transporte en todo momento si interferir en la carga o en su entorno, desde una o varias estaciones remotas. Los datos pueden ser enviados y recibidos desde la cabina del camión, de esta manera el conductor puede conocer en tiempo real el estado de la carga que transporta. También es viable implementar una red inalámbrica de área local (WLAN) entre las distintas unidades de transporte (contenedores) que se encuentren en un depósito o por ejemplo viajando en un mismo barco. Los datos pueden ser transmitidos a un servidor remoto enlazando la WLAN con un modem GPRS, integrando el contenedor en una red global de telecomunicaciones. En cualquier momento de la cadena de transporte intermodal: barco, puerto, camión, etc. El servidor puede recibir y enviar órdenes a los actuadores, permitiendo la activación a distancia del equipo de frío, para el pre-enfriado y ajustes durante el transporte.

CONCLUSIONES

El sistema propuesto es capaz de proporcionar información completa en tiempo real sobre el estado de los productos transportados y proporcionar a todos los operadores la información necesaria para cumplir con los requisitos de trazabilidad vigentes en la UE.

La supervisión multidistribuida requiere una integración robusta y eficiente de diferentes tecnologías emergentes: Sensores, Redes de Control de Área, Redes inalámbricas de sensores, Identificadores por Radio Frecuencia, Aplicaciones de gestión de flotas. Existen protocolos estandarizados para cada una de estas tecnologías, el reto es interconectarlas mediante las puertas de enlace apropiadas.

El sistema propuesto suministra información útil sobre los procesos de la cadena agroalimentaria. Este conocimiento puede ser empleado por las distintas partes para realizar mejoras que aumenten la eficiencia durante el transporte y distribución de los productos hortofrutícolas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias a la financiación del Ministerio de Educación y Ciencia a través del proyecto de investigación SENSOFRIGO y al apoyo de la Comunidad de Madrid a través de TAGRALIA.

BIBLIOGRAFÍA

- Akyildiz, F.; Su W.; Sankarasubramaniam Y.; Cayirci E., 2002. Wireless sensor networks: a survey, *Computer Networks*, 38, pp. 393-422.
- Craddock, R.J.; Stansfield, E.V., 2005. Sensor fusion for smart containers. *Signal Processing Solutions for Homeland Security. The IEE Seminar on (Ref. No. 2005/11108)*. 11 Oct. 2005. 12 pp.-ISBN: 0-86341-564-4
- EC., 2002. Regulation (EC) No 178/2002 laying down the general principles and requirements of food law, establishing the European Food Safety Authority and laying down procedures in matters of food safety. 28 January 2002.
- EC., 2004. Guidance on the implementation of articles 11, 12, 16, 17, 18, 19 And 20 of regulation (EC) No 178/2002 on general food law. Conclusions of the standing committee on the food chain and Animal health. Available in http://europa.eu.int/comm/food/food/foodlaw/guidance/guidance_rev_7_en.pdf [5 Feb, 2006].
- FAOSTAT, 2007. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://faostat.fao.org/> [30 Mar, 2007]

- GDV., 2005. Container handbook - Cargo loss prevention from German marine insurers. German Insurance Association. Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft E.V. Available at www.containerhandbuch.de [3 Feb, 2006].
- Giannopoulos G.A., 2004. The application of information and communication technologies in transport. *European Journal of Operational Research* 152, 302-320.
- Giberti, A.; Carotta, M.C.; Guidi, V.; Malagù, C.; Martinelli, G.; Piga, M.; Vendemiati, B., 2004. Monitoring of ethylene for agro-alimentary applications and compensation of humidity effects. *Sensors and Actuators B* 103 (2004) 272–276
- ISO 10368. 1992. Freight thermal containers-Remote condition monitoring. ISO Standard.
- ISO 11992. 2003. Road vehicles-Interchange of digital information on electrical connections between towing and towed vehicles -. ISO Standard.
- Jedermann R.; Behrens C.; Westphal D.; Lang W., 2006. Applying autonomous sensor systems in logistics – Combining sensor networks, RFIDs and software agents. *Sensors and Actuators A: Physical*. Article in press.
- Maxwell D.; Williamson R., 2002. Wireless temperature monitoring in remote system. Available in www.sensorsmag.com/articles/1002/26/ [6 Feb, 2007].
- NMEA., 2000. National Marine Electronics Association. NMEA 2000 Standard For Serial-Data Networking Of Marine Electronic Devices.
- Qingshan S.; Ying L.; Gareth, P.; Brown D., 2004. Wireless Intelligent Sensor Networks for Refrigerated Vehicle. *IEEE 6th Symp. on Emerging Technologies: Mobile and Wireless Communication*. Shanghai, China.
- Rodríguez-Bermejo, J.; Barreiro, P.; Robla, J. I.; Ruiz-Garcia, L., 2006. Thermal study of a transport container. *Journal of Food Engineering* 80(2)(2006), pp. 517-527.
- Rodríguez-Bermejo, J.; Barreiro, P.; Robla, J. I., Ruiz-Garcia, L., 2007. Analysis of the thermodynamic behavior of a refrigeration system: pressure and temperature variations and regulation mechanisms. Submitted .
- Ruiz-Garcia, L.; Rodríguez Bermejo, J.; Barreiro, P.; Ruiz-Altisent, M., 2005. Definición de las especificaciones de una Unidad Electrónica de Control (ECU) CANbus para la supervisión del transporte de frutas y hortalizas. *Agroingeniería* 2005. León, 21-24 de septiembre. Book of abstracts.
- Ruiz-Garcia, L.; Gutierrez, P.; Barreiro, P.; Robla, J.I.; Rodríguez-Bermejo, J., 2006. Application of LVF-IR specific sensors for volatile assessment in fruits. *World Congress: Agricultural engineering for a better world*. Book of Abstracts ISBN 3-18-091958-2. Bonn (Alemania). Septiembre 2006.
- Ruiz-Garcia, L.; Barreiro, P.; Rodríguez-Bermejo, J.; Robla, J.I., 2007. Monitoring intermodal refrigerated fruit transport using sensor networks: a review. *Spanish Journal of Agricultural Research*. In press.
- Tanner, D.J.; Amos, N.D., 2003. Temperature Variability during Shipment of Fresh Produce. *Postharvest Unlimited*. *Acta Hort.* 599.