



IX congreso ibérico de  
**AGROENGENHARIA 2017**  
4 a 6 de setembro  
Bragança – Portugal

## **Evaluación del comportamiento dinámico de sensores de temperatura: aplicación a la cadena de frío**

Miguel.G. Manchego<sup>1</sup>, Miguel Garrido-izard<sup>1</sup>, Eva C. Correa<sup>2</sup>, Belén Diezma<sup>1</sup>, Pilar Barreiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio de Propiedades Físicas y Tecnologías Avanzadas en Agroalimentación, LPF\_TAGRALIA, Departamento de Ingeniería Agroforestal, ETSI Agronómica Alimentaria y de Biosistemas, Universidad Politécnica de Madrid, av. Puerta de Hierro 2, 28040 Madrid, España, [miguel.garrido.izard@upm.es](mailto:miguel.garrido.izard@upm.es), [belen.diema@upm.es](mailto:belen.diema@upm.es), [pilar.barreiro@upm.es](mailto:pilar.barreiro@upm.es)

<sup>4</sup> Laboratorio de Propiedades Físicas y Tecnologías Avanzadas en Agroalimentación, LPF\_TAGRALIA, Departamento de Química y Tecnología de Alimentos, ETSI Agronómica Alimentaria y de Biosistemas, Universidad Politécnica de Madrid, av. Puerta de Hierro 2, 28040 Madrid, España, [evacristina.correa@upm.es](mailto:evacristina.correa@upm.es)

### **Resumen**

El presente estudio plantea evaluar la respuesta dinámica de 4 tipos de sensores de temperatura integrados en distintos dispositivos de adquisición de datos, en mayor o menor medida encapsulados y con o sin comunicación inalámbrica, dentro de cámaras refrigeradas térmicamente controladas. Los sensores fueron sometidos a 5 rampas de temperatura, fijadas previamente según las condiciones reales de almacenamiento y distribución en refrigeración y en congelación para distintos grupos de alimentos. La respuesta dinámica de estos sensores de temperatura corresponde a un sistema de primer orden y siguen un comportamiento exponencial. El ajuste a las curvas exponenciales creciente y decreciente de las respuestas de los sensores a rampas de temperatura ascendentes y descendentes respectivamente, permitió caracterizar su respuesta dinámica en términos de tiempo de respuesta y tiempo característico, variables que se utilizaron para realizar una comparativa entre los distintos dispositivos ensayados.

Los 2 factores analizados que influyen en el comportamiento dinámico de los sensores, tipo de sensor y salto térmico, demostraron tener un efecto significativo en los tiempos de respuesta de los sensores, siendo el principal factor de significación el tipo de sensor con una  $F = 209.8$  ( $p < 0.05$ ). Los sensores poco encapsulados mostraron un tiempo característico promedio de 157.4 s, 3 veces menor que los registrados por los sensores altamente protegidos, mostrando así mayor aptitud para ser aplicados en la supervisión de la cadena de frío. En el caso de operaciones de refrigeración que no presenten variaciones térmicas muy altas o de corta duración, incluso los sensores más encapsulados estudiados podrían ser utilizados puesto que cumplen con la normativa en vigor UNE-EN 12830:2000

**Palabras clave:** Sensores autónomos, Alimentos frescos, Gradientes de temperatura, Rotura de cadena de frío, Seguridad alimentaria

# Evaluation of the dynamic behaviour of temperature sensors: application to the cold chain

## Abstract

The present study aims evaluated the dynamic response of four temperature sensors embedded in different data acquisition devices, to a greater or lesser extent encapsulated and with or without wireless communication, in thermally controlled refrigerated chambers. The sensors will be submitted to five different temperature ramps, previously established based on the actual conditions of transport and distribution of different types of food. The dynamic response of these temperature sensors corresponds to a first-order system and follows an exponential behavior. The adjustment to the increasing and decreasing exponential curves of the responses of the sensors to ascending and descending temperature ramps respectively allowed to characterize their dynamic response in terms of response time and characteristic time, variables that were used to make a comparison between the different devices tested.

The 2 analyzed factors that influence the dynamic behavior of the sensors: type of sensor and thermal jump, demonstrated to influence directly, although in different degree, on the sensor response time, being the main factor of significance the type of sensor with  $F=209.8$  ( $p < 0.05$ ). The low-encapsulated sensors showed an average characteristic time of 157.4 s, three times lower than those recorded by the highly-encapsulated sensors, thus showing greater aptitude to be applied in monitoring the cold chain. In the case of refrigeration operations that do not show very high thermal variations or of short duration, even the most encapsulated sensors tested could be used since they are agreeing with the rule UNE-EN 12830:2000.

**Keywords:** Autonomous sensors, Fresh food, Temperature gradients, Cold chain break, Food safety

## 1. Introducción

El desarrollo de sensórica, loggers miniaturizados y tecnología de comunicación inalámbrica ha crecido mucho en los últimos años, lo que sumado a la reducción en los costes de fabricación, nos ofrece una amplia gama de oportunidades para la investigación y el desarrollo en campos tales como el monitoreo de contenedores de transporte de productos refrigerados y las instalaciones de almacenamiento en frío (Ruiz-Garcia, Barreiro et al. 2010). Entre las principales ventajas de su utilización destacan el poco espacio que ocupan, su poca interferencia con los procesos que se llevan a cabo y su facilidad para la instalación, lo que facilita la supervisión multi-distribuida de la temperatura en un ambiente cerrado (Jimenez-Ariza, Correa et al. 2014).

Precisamente, un problema crítico que se presenta en la industria alimentaria es el relacionado con la calidad de los productos y las pérdidas durante el transporte. Aquí el estudio de la variabilidad de la temperatura consigna en cámaras frigoríficas y contenedores resulta ser importante. Los transportes refrigerados de larga distancia son un buen ejemplo de esta alta inestabilidad, ya que algunas investigaciones reflejan variaciones máximas de temperaturas registradas que llegan hasta los 11.3°C.

Es pertinente señalar que, dependiendo del alimento que se esté transportando la temperatura consigna será diferente, así mismo, las fluctuaciones serán más o menos restrictivas en función del producto trasladado (*Figura 1*). Teniendo en cuenta el amplio rango de temperaturas de trabajo que se puede encontrar en la industria alimentaria, los distintos instrumentos que el mercado ofrece para el control y supervisión de la temperatura de almacenamiento y transporte a lo largo de la cadena de frío deben ser suficientemente fiables para cada caso y cumplir el Reglamento CE 37/2005 (AECOC 2014).



Figura 1. Temperaturas recomendadas para distintos tipos de productos refrigerados (AECOC 2014)

Teniendo en cuenta las situaciones particulares de cada entorno, resulta importante caracterizar el comportamiento dinámico de los sensores de temperatura en distintos rangos, poniendo especial atención en el tiempo de respuesta, entendido como el tiempo que transcurre desde que se produce un cambio a la entrada del sistema hasta que se percibe en la salida del mismo. Por otro lado, cabe resaltar que, no solo los distintos rangos de temperatura de trabajo pueden influir en el tiempo de respuesta, en sensorica integrada, todo lo que suponga un elevado nivel de protección contra ambientes agresivos va generalmente acompañado de un incremento de este parámetro, que puede resultar muy perjudicial a la hora de detectar con exactitud las roturas breves de la cadena de frío (Correa Hernando and Barreiro Elorza 2015).

Por tanto, tener información sobre el desempeño de estas tecnologías en ambientes térmicamente controlados, además de las documentadas por el fabricante en las fichas técnicas, pretende ser una herramienta de apoyo para el usuario a la hora de elegir e implementar un dispositivo sensor u otro. Así, el objetivo de este trabajo es evaluar la respuesta dinámica de cuatro tipos de sensores de temperatura integrados en distintos dispositivos de adquisición de datos, en mayor o menor medida encapsulados y con o sin comunicación inalámbrica, dentro de cámaras refrigeradas térmicamente controladas y su aptitud, en términos de tiempo de respuesta del sensor, para la supervisión de la cadena de frío.

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1. Materiales: sensores y cámaras de refrigeración

En este trabajo se han utilizado sensores de temperatura del tipo circuito integrado. Estos sensores se incorporan en dispositivos comerciales que además disponen de sistema de registro de datos y batería lo que les confiere suficiente autonomía en la supervisión de la cadena de frío (Tabla 1): Temptale TT4 Modelo Tradicional (Sensitech, Massachusetts, EE. UU.) (Figura 2a); CAEN RFID con sonda externa A927ZET (CAEN RFID, Viareggio, Italia) (Figura 2b); TurboTag T-700B (Sealed Air, Carolina del Norte, EE. UU.) (Figura 2c); e Ibutton DS1923 (Dallas Semiconductor, Texas, EE. UU.) (Figura 2d).

Se ha contado con la colaboración del Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos y Nutrición (ICTAN) que dispone de una amplia batería de cámaras de refrigeración-congelación térmicamente controladas, de las cuales se utilizaron 5 para la realización del presente trabajo (Tabla 2). Durante la realización de los ensayos las cámaras se mantuvieron vacías y el acceso restringido. Las cámaras cuentan con sondas PT100 que registran los valores de la temperatura interior cada 5 min (Figura 3).



Figura 2. (a) Sensor Temptale y Lector para Temptale. (b) Sensor CAEN RFID con sonda y Lector CAEN RFID (c) Tarjeta TurboTag y Lector de Escritorio DR-1 para Turbo Tag. (d) Ibutton y Lector de Escritorio para Ibutton.

Tabla 1. Principales Características de los sensores según fichas técnicas del fabricante.

Características	TEMPTALE	CAENRFID	TURBOTAG T-702	IBUTTON-HYGROCRON
Rango de trabajo	-30 a +70 °C	- 40 a + 70 °C	-55 a +70 °C	-20 a +85 °C 0 a 100 % HR
Precisión (°C)	± 1.1 (-30 a -18) ± 0.55 (-18 a +50) ± 1.1 (+50 a +70)	± 0.1	± 0.5	± 0.5
Resolución (°C)	0.1	0.1	No especificado	Seleccionable: 0.5 o 0.0625
Memoria (nºdatos)	1920	8000	702	8192
Intervalo de Muestreo	10 s a 2 h	8 s a 18 h	3 s a 175 días	1 s a 273 h
Comunicación inalámbrica	NO	SI RFID	SI RFID	NO
Tiempo de Respuesta	No especificado	20 min (Para alcanzar 90% de un cambio de +25°C a +70°C)	No especificado	5 min (Para alcanzar 90% de un cambio de -1°C a +19.5°C)



Figura 3. (a) Ubicación de la sonda (PT100) en el interior de una cámara. (b) Sensores colocados en la estantería de una de las cámaras

Tabla 2. Características de las cámaras de refrigeración empleadas en los ensayos en el ICTAN

Nº de cámara	Superficie (m <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	Evaporador	Líquido refrigerante
15	5.21	11.46	Glicol de 50 Hz	Temper -40
21	12	26.40	Glicol de 50 Hz	Temper -40
26	3.9	10.53	Glicol de 50 Hz	Glicol de Propileno 30%
30	5.21	11.46	Glicol de 50 Hz	Temper -40
33	4.45	12.02	Glicol de 50 Hz	Glicol de Propileno 30%

## 2.2. Métodos

Se realizaron dos series de ensayos por cada rampa de temperatura propuesta, el protocolo general consistió en colocar los sensores en una cámara a baja temperatura durante 60 minutos, luego cambiarlos a otra con temperatura más alta durante 30 minutos y finalmente devolver los sensores a la cámara inicial durante 30 minutos más, registrando un total de 120 minutos por ensayo. Para la segunda serie de cada ensayo la metodología fue la misma pero esta vez iniciando en la cámara con temperatura más alta. Para el ensayo con el salto térmico más grande (46°C), los tiempos fueron de 60 minutos en cada cámara, para de esta forma asegurar que los sensores llegaran a estabilidad antes de hacer el cambio de cámara.

Las temperaturas de los ensayos (Tabla 3) fueron propuestas en base a las recomendaciones AECOC para la logística (RAL) que resume la normativa de aplicación para la conservación y transporte de alimentos refrigerados y congelados destinados al consumo humano (Figura 1).

Tabla 3. Descripción de los ensayos realizados.

Nº Ensayo	Nº repeticiones	Rampas de Temperatura (°C)			
		0-60 min	60-90 min	90-120 min	Salto térmico ( $\Delta T$ )
1	2	-20	-10	-20	10
2	2	-2	+18	-2	20
3	2	+6	+24	+6	18
4	2	+10	+26	+10	16
5	2	-20	+26*	-20*	46

\*en ensayo 5 los tiempos de permanencia a las temperaturas de +26 y -20 °C fueron de 60-120 min y de 120-180 min respectivamente.

Se usaron 3 sensores de cada modelo en cada uno de los ensayos, a excepción del sensor Temptale, del cual se utilizó uno en cada ensayo debido a la no disponibilidad de más dispositivos de este tipo (n=228 rampas). Es importante mencionar que los sensores Ibutton no fueron empleados en las rampas que incluían la temperatura de cámara de -20°C debido a que la ficha técnica sitúa su rango de seguridad a esta temperatura. El intervalo o periodo de adquisición de los datos fue para cada sensor igual en todos los ensayos, a excepción del ensayo 5, donde se incrementó el intervalo ya que la duración total del ensayo fue mayor (Tabla 4).

Tabla 4. Frecuencia de Adquisición de datos en segundos

	TEMPTALE	CAENRFID	TURBOTAG	IBUTTON
Ensayos 1, 2, 3 y 4	10	8	12	3
Ensayo 5	10	16	18	3

### 2.1. Modelo matemático

Los transductores de temperatura suelen responder a sistemas de primer orden (Fraile Mora, García Gutiérrez et al. 2014), según la ecuación diferencial 1 donde  $q$  representa la salida del transductor,  $m$  la señal física de entrada y  $A$  y  $B$  son constantes,

$$A \frac{dq}{dt} + Bq = m. \quad (1)$$

En estos sistemas el estudio del tiempo de respuesta de un sensor se puede realizar aplicando a la entrada cambios bruscos de temperatura a manera de escalones o rampas, de forma que al aplicar un escalón positivo o rampa ascendente a la entrada de un sistema con ordenada en el origen distinta de 0 la ecuación de aplicación sería (Badia-Melis, Garcia-Hierro et al. 2014):

$$y = a \left( 1 - e^{-\frac{x}{\tau}} \right) + c, \quad (2)$$

mientras que para un escalón negativo o rampa descendente de temperaturas

$$y = a \left( e^{-\frac{x}{\tau}} \right) + c, \quad (3)$$

donde  $y$  es la temperatura  $T(^{\circ}\text{C})$  registrada por el sensor a un tiempo  $t(\text{s})$ ,  $a$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) es el salto de temperatura aplicado,  $\tau(\text{s})$  es la constante de tiempo del sistema o tiempo característico, siendo el tiempo que tarda la variable de salida en alcanzar el 63.2% del valor de régimen final, y  $c(^{\circ}\text{C})$  es la temperatura antes de iniciarse el salto térmico en el caso de la rampa ascendente, o la temperatura final a estabilidad en el caso de la rampa descendente.

Todo el proceso de ajuste de las curvas exponenciales se llevó a cabo con el programa MatLab<sup>®</sup> usando la función *fitmodel* para la estimación de los parámetros de ajuste del modelo  $a$ ,  $c$  y  $\tau$ . La bondad del ajuste del modelo se estimó a partir de los valores del coeficiente de determinación ( $r^2$ ) y del error cuadrático medio (rmse ( $^{\circ}\text{C}$ )).

Una vez ajustadas las rampas (subida y bajada) con su respectiva curva exponencial (creciente o decreciente), se calculó a partir de la curva de ajuste y utilizando la función *solve* de MATLAB el parámetro tiempo de respuesta  $t_{90}$ , que se define como el tiempo que se necesita para que el valor registrado por cada sensor alcance el 90% de la variación real de la temperatura aplicada (norma EN 12830:1999) (Figura 4).

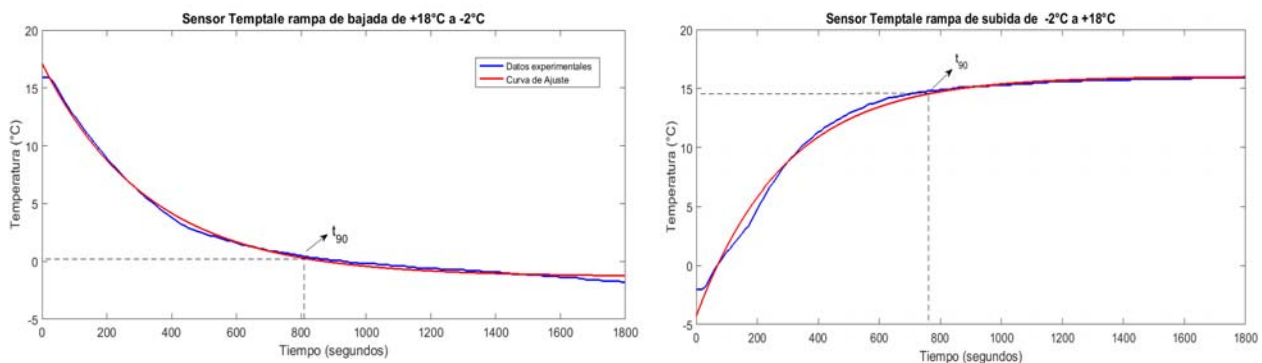


Figura 4. ejemplo de ajuste del modelo exponencial (línea roja) a los datos esperimetales(línea azul) registrados por el sensor Temptale e indicación del cálculo del parámetro tiempo de respuesta  $t_{90}$

### 3. Resultados y Discusión

La Figura 5 muestra los valores promedio del coeficiente  $r^2$  de ajuste del modelo exponencial, indicando un efecto significativo ( $F=35784.74$ ,  $p<0.05$ ) del tipo de ensayo realizado sobre la respuesta transitoria de la instrumentación. El ensayo 1 desarrollado íntegramente a temperaturas negativas se ajusta al modelo con un valor promedio de  $r^2$  de 0.82, mucho más bajo que el alcanzado

en el resto de ensayos. Los datos experimentales registrados durante este ensayo (Figura 5) muestran como el traslado de los sensores de una cámara a  $-10^{\circ}\text{C}$  a otra a  $-20^{\circ}\text{C}$  y viceversa, pasando a través de un pasillo a temperatura ambiente, afecta a la instrumentación que registra una subida de temperatura tanto más acusada cuanto mayor es la sensibilidad del sensor. Esta alteración de la dinámica del sensor hace que su respuesta no se ajuste correctamente al modelo exponencial aplicado al salto de temperaturas de  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $-20^{\circ}\text{C}$ , razón por la que los datos correspondientes al ensayo 1 no se tendrán en cuenta a partir de este momento.

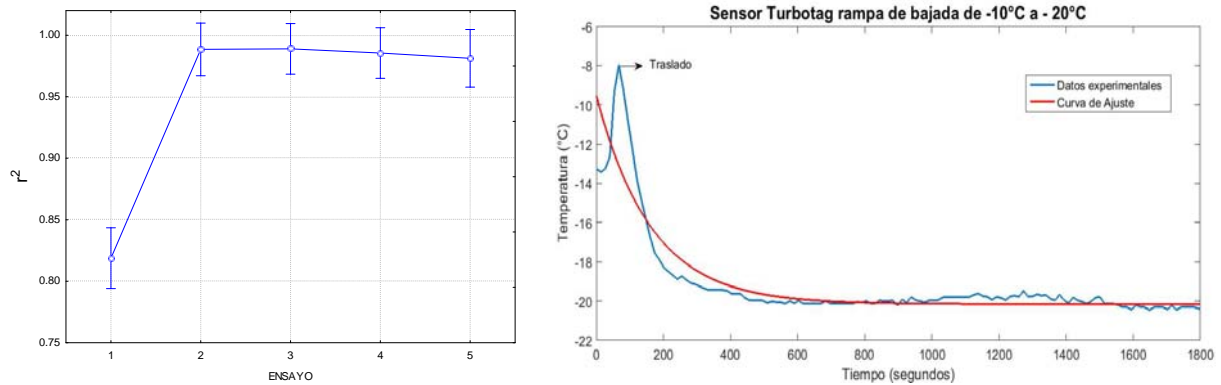


Figura 5. Izquierda: Gráfico de medias por mínimos cuadrados del coeficiente de determinación ( $r^2$ ) para cada ensayo. Derecha: datos experimentales (azul) y curva de ajuste exponencial (rojo) para rampa descendente de temperaturas registrada por el sensor TurboTag

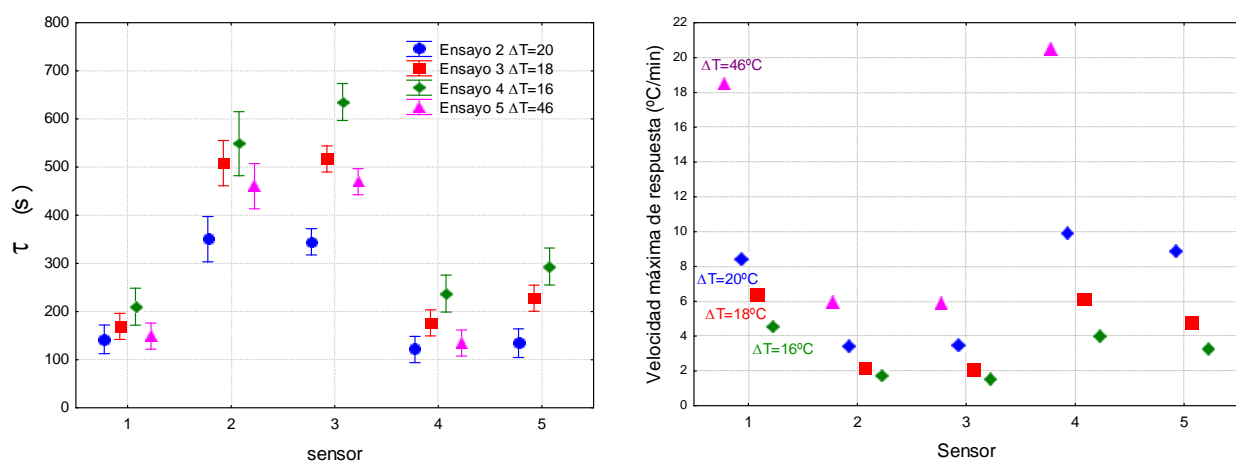
Así excluyendo el ensayo 1, la dinámica del conjunto de sensores estudiados ante las rampas de temperaturas aplicadas se ajustan muy bien al sistema de primer orden descrito por las ecuaciones 2 y 3 con un valor promedio de  $r^2$  de 0.986 y con un rmse promedio de tan sólo  $0.48^{\circ}\text{C}$  (Tabla 5).

Tabla 5. Bondad de ajuste del modelo a los datos experimentales según el tipo de sensor. M: media, DT: desviación típica, N:  $n^{\circ}$  individuos. Sensores: 1=TurboTag, 2=TEMPTALE, 3=CAEN RFID, 4=CAEN RFID sonda externa y 5 = lbutton

	N	$r^2$		rmse ( $^{\circ}\text{C}$ )	
		M	DT	M	DT
Total	192	0.986	0.01	0.48	0.33
Sensor 1	46	0.981	0.01	0.61	0.31
Sensor 2	16	0.996	0.00	0.33	0.29
Sensor 3	48	0.995	0.01	0.36	0.33
Sensor 4	48	0.981	0.01	0.57	0.39
Sensor 5	34	0.985	0.01	0.38	0.16

El tiempo característico promedio del conjunto de sensores ha sido de  $297.7\text{s}$ , sin embargo el análisis factorial de varianza realizado muestra que existe un efecto significativo ( $F=5.64$ ,  $p<0.05$ ) de la interacción de los factores tipo de sensor y tipo de ensayo realizado. La Figura 6 muestra que los sensores 2 y 3 con un tiempo característico promedio de  $455.2$  y  $471.2$  segundos respectivamente casi triplican los valores de la constante de tiempo promedio para los sensores 1, 4 y 5 con valores de  $\tau$  de  $162.5$ ,  $157.4$  y  $208.4$  segundos respectivamente. El efecto sobre la constante de tiempo del factor tipo de sensor es el más significativo ( $F= 454.4$ ,  $p<0.05$ ), mostrando que los sensores 2 y 3 correspondientes al TEMPTALE y CAEN RFID que son los que presentan mayor grado de encapsulado o protección frente al medio exterior tienen tiempos característicos más elevados. Resultados similares han sido descritos por (Badia-Melis, Garcia-Hierro et al. 2014), obteniendo tiempos característicos mucho mayores para sensores con elevado grado de encapsulado al aplicarles un salto de temperaturas de  $35^{\circ}\text{C}$ .

El análisis de varianza también muestra que el tipo de ensayo y rampa de temperaturas aplicadas tiene un efecto significativo sobre el tiempo característico ( $F=96.3$ ,  $p<0.05$ ), aunque mucho menos importante que el efecto del tipo de sensor empleado. Para poner de manifiesto el efecto del tipo de ensayo, en la *Figura 6* se representa también la pendiente promedio máxima o velocidad máxima de respuesta del sensor, calculada como la relación entre el salto térmico total aplicado y el tiempo característico  $\tau$ . Se observa cómo a mayor salto térmico, que en este trabajo corresponde con el aplicado en el ensayo 5 ( $\Delta T=46^\circ\text{C}$ ) mayor tasa de respuesta del sensor, de forma que a medida que el salto térmico disminuye, la velocidad de respuesta disminuye tal y como corresponde a un proceso de transferencia de calor entre el medio exterior y el dispositivo sensor en el que la fuerza impulsora de dicho proceso es el salto térmico aplicado. Del mismo modo se vuelve a poner en evidencia como los sensores 2 y 3 tienen las menores tasas de respuesta para todos los ensayos realizados. Tomando como ejemplo el ensayo 2 caracterizado por un salto térmico de  $20^\circ\text{C}$  los sensores 2 y 3 reflejan una velocidad máxima de respuesta promedio de  $3.5^\circ\text{C}/\text{min}$ , frente a una tasa promedio para los sensores 1, 4, y 5 de  $9.1^\circ\text{C}/\text{min}$ .



*Figura 6. Gráfico de medias por mínimos cuadrados para el tiempo característico (izquierda) y velocidad máxima de respuesta (derecha) según el tipo de sensor y ensayo realizado.  $\Delta T$  ( $^\circ\text{C}$ ) es el salto térmico. Las líneas verticales sobre las medias indican el intervalo de confianza al 95%. Sensores: 1=TurboTag, 2=TEMPTALE, 3=CAEN RFID, 4=CAEN RFID sonda externa y 5 = Ibutton*

Con respecto a los tiempos de respuesta y tal como era de esperar el principal efecto significativo ( $F=209.8$ ,  $p<0.05$ ) es el debido a la instrumentación. En el valor del tiempo de respuesta, que corresponde a la zona de la curva exponencial en el que la pendiente tiende a 0 una vez alcanzado prácticamente el equilibrio o estabilidad del sistema al aplicar la rampa de temperaturas, el efecto del tipo de ensayo o rampa aplicada disminuye aunque sigue siendo significativo con un valor de  $F=11.6$  ( $p<0.05$ ). De nuevo los mayores tiempos de respuesta (*Figura 7*) corresponden a los sensores 2 (TEMPTALE) y 3 (CAEN RFID) con un  $t_{90}$  promedio de 20.3 y 20.7 min respectivamente. Frente a estos, los sensores 1 (TurboTag), 4 (CAEN RFID sonda externa) y 5 (Ibutton) responden casi tres veces más rápido con valores de  $t_{90}$  promedios de 12.4, 7.7 y 7.04 min respectivamente. Al comparar estos tiempos de respuesta con los especificados por el fabricante (Tabla 1) para los sensores 3 (CAEN RFID, 20 min para  $\Delta T=45^\circ\text{C}$ ) y 5 (Ibutton, 5 min para  $\Delta T=20.5^\circ\text{C}$ ), observamos como los resultados obtenidos en este trabajo están en el mismo orden siendo de 22.5 min para CAEN RFID ( $\Delta T=46^\circ\text{C}$ ) y de 8.3 min para Ibutton ( $\Delta T=20^\circ\text{C}$ ).

Según la norma UNE-EN 12830 el tiempo de respuesta para registradores con sensor externo debe ser como máximo de 10 minutos en transporte y de 20 minutos para almacenamiento, para el caso de registradores con sensor interno el tiempo de respuesta debe ser como máximo de 60 min (la norma UNE-EN 12830 no define de forma precisa a qué se refiere con sensor externo y sensor interno).



Si atendemos al grado de encapsulado de los sensores estudiados, se podría considerar que los sensores 1 (TurboTag) y 5 (Ibutton) con un nivel de protección o recubrimiento bajo tienen un comportamiento dinámico similar al correspondiente a un registrador con sensor externo, el sensor 4 corresponde al sensor externo del registrador CAEN RFID, mientras que los sensores 2 y 3 con un elevado grado de encapsulado y protección del medio externo se encontrarían claramente dentro del grupo de registradores con sensor interno. Según esta propuesta de clasificación de nuestros dispositivos y aplicando la norma UNE-EN 12830, los sensores 2 y 3 con un  $t_{90} < 60$  min cumplen con la normativa, los sensores 1 y 4 con  $t_{90} < 10$  min cumplen con la norma para su uso en transporte y almacenamiento para todos los casos estudiados y el sensor 5 con  $t_{90} < 20$  min es apto para su uso en almacenamiento y el cumplimiento de la normativa para transporte para registradores con sensor externo dependerá de los saltos térmicos esperados ya que para  $\Delta T < 20^\circ\text{C}$  el  $t_{90}$  registrado es mayor a 10 min (Figura 7).

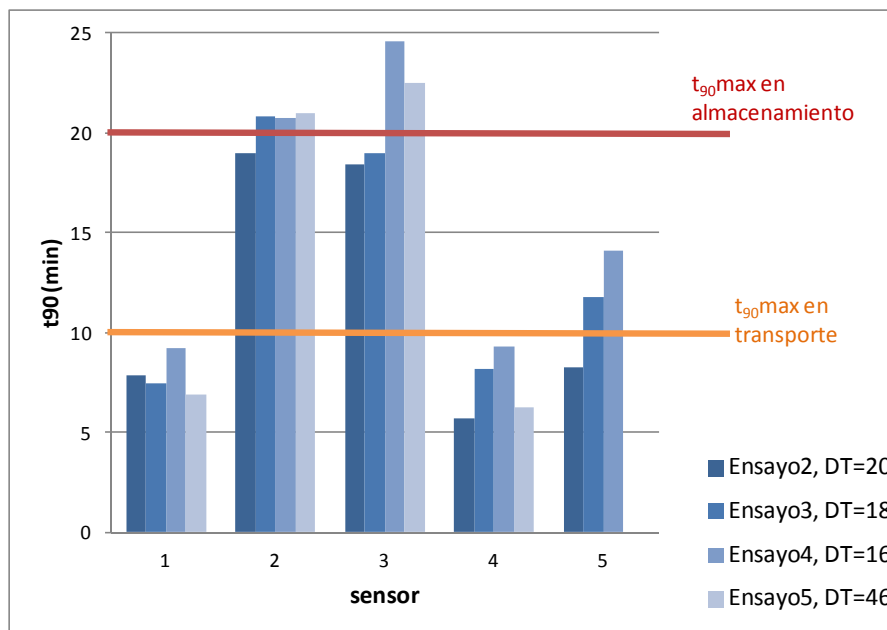


Figura 7. Gráfico de columnas que representan el tiempo de respuesta promedio para cada sensor y ensayo realizado. Las líneas horizontales representan el tiempo de respuesta máximo para registradores con sensor externo según la norma UNE-EN 12830:2000. El salto térmico se indica con  $DT = \Delta T (^\circ\text{C})$ . Sensores: 1=TurboTag, 2=TEMPTALE, 3=CAEN RFID, 4=CAEN RFID sonda externa y 5 = Ibutton

#### 4. Conclusiones

Este trabajo muestra como los cuatro sensores comerciales estudiados cumplen con la normativa en vigor para el uso de registradores de temperatura en el control de la cadena de frío en lo que se refiere a la variable tiempo de respuesta, mostrando todos un tiempo de respuesta por debajo de los 25 minutos y tres de ellos por debajo de los 15 minutos.

Sin embargo, se han constatado diferencias significativas entre los distintos dispositivos tanto para la variable tiempo de respuesta, como para el tiempo característico, como para la velocidad máxima de respuesta de cada sensor, que están relacionadas directamente con el grado de protección y encapsulado de los distintos dispositivos. De forma que los dispositivos comerciales menos encapsulados, TurboTag e Ibutton, junto con el sensor localizado en la sonda externa de temperatura del CAEN RFID, responden prácticamente tres veces más rápido que los sensores más encapsulados TempTale o CAEN RFID (sensor interno), mostrando además velocidades promedio máximas de respuesta de hasta  $19^\circ\text{C}/\text{min}$  en situaciones de grandes cambios de temperatura ( $\Delta T = 46^\circ\text{C}$ ).

En sistemas en los que se prevean cambios rápidos de temperatura como por ejemplo en un transporte a corta distancia para la distribución local de producto refrigerado o en los que se puedan

dar eventos de corta duración como una apertura de puertas para la inspección de un transporte, o los ciclos de desescarchado de los evaporadores, la elección de aquellos dispositivos con tiempos de respuesta cortos y velocidades de respuesta elevadas será indispensable en la supervisión de la cadena de frío.

## **Agradecimientos**

Este trabajo ha sido financiado por la Comunidad de Madrid y la Unión Europea a través del proyecto S2013/ABI-2747 (TAVS-CM) y realizado en el marco de la red CYTED HORTYFRESCO (113RT0480). Agradecemos la colaboración de la investigadora Begoña de Ancos (ICTAN-CSIC) para el uso de las instalaciones de refrigeración.

## **Bibliografía**

- AECOC, 2014: Distribución de productos refrigerados *Recomendaciones AECOC para la logística (RAL)*. pp. 19. AECOC.
- Badia-Melis, R., J. Garcia-Hierro, L. Ruiz-Garcia, T. Jimenez-Ariza, J. I. R. Villalba and P. Barreiro, 2014: Assessing the dynamic behavior of WSN motes and RFID semi-passive tags for temperature monitoring. *Computers and Electronics in Agriculture* **103**, 11-16.
- Correa Hernando, E. C. and P. Barreiro Elorza, 2015: Poscosecha de precisión en los albores del siglo XXI (PARTE I). *horticultura*, 62-67.
- Fraile Mora, J., P. García Gutiérrez and J. Fraile Ardanuy, 2014: Instrumentación aplicada a la ingeniería.
- Jimenez-Ariza, T., E. C. Correa, B. Diezma, A. C. Silveira, P. Zocalo, F. J. Arranz, A. Moya-Gonzalez, M. Garrido-Izard, P. Barreiro and M. Ruiz-Altisent, 2014: The Phase Space as a New Representation of the Dynamical Behaviour of Temperature and Enthalpy in a Reefer monitored with a Multidistributed Sensors Network. *Food and Bioprocess Technology* **7**, 1793-1806.
- Ruiz-Garcia, L., P. Barreiro, J. Ignacio Robla and L. Lunadei, 2010: Testing ZigBee Motes for Monitoring Refrigerated Vegetable Transportation under Real Conditions. *Sensors* **10**, 4968-4982.