



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
AGRONÓMICA ALIMENTARIA Y DE BIOSISTEMAS**

**“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE
SENSORES DE TEMPERATURA INTEGRADOS EN DIFERENTES
DISPOSITIVOS DE ADQUISICIÓN DE DATOS: APLICACIÓN A
LA CADENA DE FRIO”**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MIGUEL GONZALO MANCHEGO HUAQUIPACO

MADRID 2016

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGROFORESTAL

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
AGRONÓMICA ALIMENTARIA Y DE BIOSISTEMAS**

**“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE
SENSORES DE TEMPERATURA INTEGRADOS EN DIFERENTES
DISPOSITIVOS DE ADQUISICIÓN DE DATOS: APLICACIÓN A
LA CADENA DE FRIO”**

ALUMNO: MIGUEL GONZALO MANCHEGO HUAQUIPACO

TUTOR: DOCTORA EVA CRISTINA CORREA HERNANDO

COTUTOR: DOCTOR MIGUEL GARRIDO IZARD

MADRID 2016

Índice

1	RESUMEN Y ABSTRACT	1
2	INTRODUCCIÓN	3
3	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
4	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	7
4.1	Cadena de Frío.....	7
4.2	Sensórica	9
4.2.1	Terminología y Definiciones	9
4.2.2	Clasificación de los sensores	10
4.3	Comportamiento dinámico	12
4.4	Supervisión de la Cadena de Frío	14
5	ANTECEDENTES Y OBJETIVOS.....	17
5.1	Antecedentes	17
5.2	Objetivos	18
6	MATERIALES Y MÉTODOS.....	19
6.1	Materiales	19
6.1.1	Sensores de Temperatura	19
6.1.2	Cámaras de Refrigeración	22
6.2	Métodos	23
6.2.1	Análisis de datos.....	25
7	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	29
7.1	Descripción de la respuesta dinámica de cada sensor.....	29
7.2	Ajuste del Modelo Exponencial.....	35
7.3	Tiempo característico.....	40
7.4	Tiempo de respuesta y parámetros T90 y T3.....	44
7.5	Discusión	48
8	CONCLUSIONES	51
9	BIBLIOGRAFÍA.....	53

Índice de Figuras

Figura 1. Clasificación de los Transductores/Sensores según el aporte de Energía. Fuente: Modificado de Fraile Mora et al. (2012).	11
Figura 2. Respuesta de un Transductor ante una entrada en forma de escalón. Fuente: Fraile Mora et al. (2012).	14
Figura 3. (a) Tarjeta Turbotag. (b) Lector de Escritorio DR-1 para Turbo Tag.	19
Figura 4. (a) Ibutton. (b) Lector de Escritorio para Ibutton.	20
Figura 5. (a) Sensor Temptale. (b) Lector para Temptale.	20
Figura 6. (a) Sensor CaenRfid con sonda. (b) Lector CaenRfid.	21
Figura 7. (a) Estantería vacía de una de las cámaras. (b) Ubicación de la sonda (PT100) al interior de una cámara.	22
Figura 8. (a) Sensores Fijados en la barra de metal. (b) Sensores colocados en la estantería de una de las Cámaras.	25
Figura 9. Ensayo $-2^{\circ}\text{C} +18^{\circ}\text{C} -2^{\circ}\text{C}$: Sensor Temptale	29
Figura 10. Ajuste exponencial ascendente sobre los datos del sensor Temptale	30
Figura 11. Ajuste exponencial descendente sobre los datos del sensor Temptale	30
Figura 12. Ensayo $+6^{\circ}\text{C} +24^{\circ}\text{C} +6^{\circ}\text{C}$: Sensor Ibutton.	31
Figura 13. Ajuste exponencial ascendente sobre los datos del sensor Ibutton	31
Figura 14. Ajuste exponencial ascendente sobre los datos del sensor Ibutton	32
Figura 15. Ensayo $-2^{\circ}\text{C} +18^{\circ}\text{C} -2^{\circ}\text{C}$: Sensores Caen y Caen Sonda	32
Figura 16. Ajuste exponencial ascendente sobre los datos del sensor Caen Sonda	33
Figura 17. Ajuste exponencial descendente sobre los datos del sensor Caen	33
Figura 18. Ensayo $-20^{\circ}\text{C} -10^{\circ}\text{C} -20^{\circ}\text{C}$: Sensor Turbotag	34
Figura 19. Ajuste exponencial ascendente sobre los datos del sensor Turbotag	34
Figura 20. Ajuste exponencial ascendente sobre los datos del sensor Turbotag	35
Figura 21. Bondad del Modelo r^2 por cada Ensayo y Sensor	37
Figura 22. ANOVA que muestra el efecto del tipo de sensor, ensayo y rampa sobre el parámetro r^2 de ajuste del modelo.	38
Figura 23. ANOVA que muestra el efecto del tipo de sensor y ensayo sobre el parámetro r^2 de ajuste del modelo.	39
Figura 24. Gráfico de correlación entre los valores reales de ΔT para cada ensayo y el parámetro a de ajuste del modelo exponencial.	39
Figura 25. Gráfico de correlación entre los valores reales de T° inicial y T° final para cada ensayo y rampa descendente y ascendente con el parámetro c de ajuste del modelo exponencial.	40
Figura 26. Comparativa del tiempo característico “ b ” o “ τ ” sobre cada sensor.	41
Figura 27. Comparativa del tiempo de respuesta sobre cada Sensor y Ensayo.	42
Figura 28. Comparativa del tiempo de respuesta sobre cada Sensor y Rampa.	43
Figura 29. Comparativa del tiempo característico registrado por cada sensor y ensayo.	44
Figura 30. Box & whisker plot que presenta los valores promedios del t_{90} para cada sensor, ensayo y rampa. La flecha indica el tiempo de 3 min (180s).	46
Figura 31. Box & whisker plot que presenta los valores promedios de DT_3 para cada sensor, ensayo y rampa. La flecha indica el salto térmico para t (63,2%).	47
Figura 32. Box & whisker plot que presenta los valores promedios del tiempo de respuesta para cada sensor, ensayo y rampa. La flecha indica la duración de los ensayos (30 min).	48

Índice de Tablas

Tabla 1. Artículos Publicados relacionados con el TFM.	16
Tabla 2. Artículos Publicados (LPF-TAGRALIA) en relación con el TFM.....	17
Tabla 3. Artículos Publicados (con participación del ICTAN) en relación con el TFM.....	18
Tabla 4. Principales Características de los Sensores Según Fichas Técnicas.	21
Tabla 5. Temperaturas de los tipos de Alimentos durante la Cadena de Frío.	24
Tabla 6. Temperaturas de los Ensayos Realizados.....	24
Tabla 7. Frecuencia de Adquisición de datos.....	25
Tabla 8. Resultados obtenidos para los parámetros “b”, “r ² ” y “rmse”.....	36
Tabla 9. ANOVA llevado a cabo para conocer el Factor que tiene mayor Efecto sobre el Tiempo de Respuesta de los Sensores.	41
Tabla 10. Resultados obtenidos para los parámetros referidos al T90.....	45

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1. Comportamiento de un Sistema de Primer Orden.....	13
Ecuación 2. Función de Transferencia en un Sistema de Primer Orden.....	13
Ecuación 3. Descripción de un Sistema de Primer Orden con entrada en forma de rampa o escalón.....	13
Ecuación 4. Comportamiento de un Sistema De Primer Orden en Rampa Decreciente	26
Ecuación 5. Comportamiento de un Sistema De Primer Orden en Rampa Ascendente	26
Ecuación 6. Adaptación de las ecuaciones de Primer Orden para una rampa Ascendente	26
Ecuación 7. Adaptación de las ecuaciones de Primer Orden para una rampa Descendente	26

1 RESUMEN Y ABSTRACT

RESUMEN

El adecuado control y supervisión de las condiciones del transporte de alimentos, es de gran importancia para la toma de decisiones de todos los agentes involucrados en su distribución y comercialización. Uno de los factores más críticos es el relacionado con la temperatura, la cual, debe estar dentro de un rango de valores que aseguren una adecuada conservación del producto, siendo estas diferentes para cada alimento. Los instrumentos para medir y registrar la temperatura deben ser apropiados y confiables en sus mediciones, de otro modo pueden no ser idóneos para la toma de decisiones durante la cadena de frío.

El presente Trabajo de Fin de Master (TFM) plantea evaluar la respuesta dinámica de los 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 serán sometidos a distintas rampas de temperatura, fijadas previamente en base a las condiciones reales de transporte y distribución de los diferentes tipos de alimentos. El análisis de los datos registrados permitirá realizar una comparativa entre ellos (precisión y tiempo de respuesta) para los distintos rangos de trabajo que estarán planteados en base a las recomendaciones de transporte y distribución de productos alimenticios.

En base a los datos obtenidos podemos afirmar que son muchos los factores que influyen en el comportamiento dinámico de los sensores, los 3 analizados en este trabajo, como el tipo de sensor, tipo de ensayo (saltos térmicos distintos) y tipo de rampa (ascendente y descendente), demostraron influir de forma directa, aunque en diferente grado, en los tiempos de respuesta de los sensores, siendo el principal factor de significación el tipo de sensor con una $F = 1530,3$. En líneas generales se puede afirmar que a mayor grado de encapsulamiento del sensor, mayor será el tiempo de respuesta dinámico.

Palabras Clave:

Sensores autónomos, Alimentos frescos, Gradientes de temperatura, Rotura de cadena de frío, Seguridad alimentaria

ABSTRACT

Adequate control and supervision of transport food conditions, are very important for all the agents involved in its distribution and marketing decisions. One of the most critical factors is related to the temperature, which should be within a range to ensure proper preservation of the product, being these different for each food. Instruments for measuring and recording the temperature must be appropriate and reliable in their measurements, otherwise may not be suitable for decision-making during the cold chain.

This Final Master Project (FMP) evaluated the dynamic response of 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 different temperature ramps, previously established based on the actual conditions of transport and distribution of different types of food. Analysis of the recorded data will allow a comparison between them (accuracy and response time) for the different work ranges based on the transport and distribution of food products recommendations.

Based on the data obtained, it can be said that many factors have influence on the dynamic behavior of the sensors. The 3 analyzed in this work, type of sensor, type of test (different temperature jumps) and type of ramp (temperatura increase or decline), demonstrated to influence directly, although in different degree, on the sensor response time, being the main factor of significance the type of sensor with $F= 1530,3$. In general it can be said that with a greater degree of sensor encapsulation , a greater dynamic time response is obtained.

Key Words:

Autonomous sensors, Fresh food, Temperature gradients, Cold Chain break, Food safety

2 INTRODUCCIÓN

La seguridad alimentaria, entendida como el acceso a suficientes alimentos inocuos y nutritivos para satisfacer las necesidades alimenticias de la población, es una preocupación mundial, y más aún en el contexto actual, donde se prevé que la población mundial aumentará en más de un tercio, o 2 300 millones de personas hasta el año 2050 (FAO, 2009). Este escenario implica que la producción de alimentos también debería crecer a un ritmo similar para cubrir esta demanda creciente, las proyecciones de la FAO indican que para alimentar una población mundial de 9 100 millones de personas en 2050 sería necesario aumentar la producción de alimentos en un 70 % (FAO, 2009). Paradójicamente, desde la producción agrícola inicial hasta el consumo final en los hogares, alrededor de un tercio de la producción de los alimentos destinados al consumo humano se pierde o desperdicia en todo el mundo, es decir 1 300 millones de toneladas al año (Gustavsson et al., 2012).

Las causas de las pérdidas y el desperdicio de alimentos en los países de ingresos bajos están principalmente relacionadas con las limitaciones económicas, técnicas y de gestión para el almacenamiento y la refrigeración en condiciones climáticas difíciles (Gustavsson et al., 2012). Detrimentos importantes se producen durante la cadena frío sobre todo por un mal control de las temperaturas consigna durante el transporte y/o almacenaje refrigerado, esta ruptura en las condiciones de transporte y/o distribución, incluso por breves periodos de tiempo, reducen significativamente el periodo de vida útil de los alimentos.

Una de las principales estrategias que harían posible reducir significativamente las pérdidas y desperdicios de alimentos pasa por apostar por la tecnología, innovación y capacitación para la recopilación de datos, implementación de buenas prácticas e inversiones en materia de infraestructura y capital para mejorar la eficiencia de los sistemas alimentarios (FAO, 2014). La introducción de sensores de temperatura integrados en diferentes dispositivos de adquisición de datos, apunta en este sentido, y busca ser un apoyo para el control y monitoreo de la de la temperatura a lo largo de los puntos críticos de la cadena de frío, ya que, en muchos productos, no tiene sentido la fecha de caducidad, si no se la asocia a su historia térmica. La trazabilidad es importante, pero no será completa, sin el reflejo de su historial térmico (Arias Carrillo et al., 2009).

La amplia oferta de sensores de temperatura hace viable su rápida introducción en el sector alimentario, sin embargo resulta de gran importancia contar con equipos adecuados que reúnan ciertas características que permitan obtener resultados confiables para la toma de decisiones. Caracterizar de forma adecuada estos sensores es básico para permitir el seguimiento de los cambios de temperatura de alta tasa y para certificar la cadena de frío (Badia-Melis et al., 2014).

3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El desarrollo de sensórica, loggers miniaturizados y tecnología de comunicación inalámbrica ha crecido mucho en los últimos años, esto, sumado a la reducción en los costes de fabricación, 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 et al., 2009). 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 (Correa et al., 2014).

Precisamente, un problema crítico que se presenta en la industria alimentaria es el relacionado con el aseguramiento de la calidad de los productos durante el transporte y la reducción de las pérdidas, donde el estudio de la variabilidad de la temperatura consigna en cámaras frigoríficas y contenedores resulta ser importante (T. Jimenez-Ariza et al., 2014). 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 (H. T. Jimenez-Ariza et al., 2015).

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. Teniendo en cuenta el amplio rango de temperaturas de trabajo que se pueden encontrar en la industria alimentaria, los distintos instrumentos que el mercado ofrece para el control y supervisión del transporte a lo largo de la cadena de frío, deben ser suficientemente confiables para cada caso.

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, entendida 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 sensórica 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 & Barreiro Elorza, 2015).

Por tanto, tener información sobre el desempeño de estas tecnologías en ambientes térmicamente controlados, además de las reportadas por el fabricante en las fichas técnicas, pretende ser una herramienta de apoyo para el usuario a la hora de elegir implementar una tecnología u otra.

4 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

4.1 Cadena de Frio

Desde que los alimentos salen de su lugar de producción, ya sea desde el campo (frutas, hortalizas), la granja (productos cárnicos y derivados) o desde la industria (alimentos procesados), las condiciones en que se transportan y distribuyen hasta el consumidor final son determinantes para asegurar la inocuidad y evitar las pérdidas del producto. Hoy por hoy, el empleo del frío en la conservación de los alimentos es un hecho y no se puede prescindir de él (Arias Carrillo et al., 2009).

La utilización del frío a lo largo del transporte y distribución de productos, tiene por objetivo asegurar la integridad y la calidad de los productos a través del control de la humedad y de la temperatura durante su transporte y distribución (Arduino et al., 2015). Esto, es lo que comúnmente se conoce como cadena de frío, que entendido de una forma sencilla, es el control de la temperatura durante la logística de la cadena de suministro de ciertos alimentos procesados, donde equipos e instalaciones especiales son utilizados para proteger y preservar los productos refrigerados y congelados (Wei, 2011). La potencia y demás características de dichos equipos estarán influenciadas por el tipo de producto y las distancias a recorrer hasta llegar al consumidor final.

Hay que indicar que el término cadena de frio, no es de uso exclusivo de la industria alimentaria, también es usado en gran medida en el sector farmacéutico donde el objetivo principal es proteger la integridad de los productos farmacéuticos desde el punto de producción y procesamiento, a través de cada una de las etapas de transporte, la manipulación, carga, descarga y almacenamiento e incluso puede extendiéndose al almacenamiento en el hogar (Rodrigue et al., 2013).

En un contexto de globalización, como el actual, donde el intercambio de bienes y/o servicios es continuo, la cadena de frio se hace muy necesaria para asegurar el comercio mundial de alimentos y productos (Salin & Nayga Jr, 2003). Es por ello que en la mayoría de países desarrollados y en vías de desarrollo, donde el comercio de productos es una actividad importante, el estado y las organizaciones públicas o privadas hacen grandes esfuerzos por implementar y/o mejorar la cadena de frío.

En España, la asociación empresarial AECOC, a través de sus normas y recomendaciones, es una de las organizaciones que busca mejorar la competitividad de toda la cadena de valor compartiendo soluciones, estándares y conocimiento que la hagan más eficiente y sostenible aportando mayor valor al consumidor.

En las Recomendaciones AECOC para la Logística (RAL) de la Distribución de Productos Refrigerados y de Productos Congelados, publicadas en Mayo del 2003 y

Noviembre de 1997 respectivamente, se recogen una serie de disposiciones que buscan mejorar la calidad de los productos que llegarán al consumidor final. Destaca la identificación de 5 tipos de productos refrigerados y los productos del tipo congelados:

- Los de Tipo 1, que son aquellos que necesitan una temperatura de conservación entre 0°C y 5° C. Los productos del Tipo 1 son la carne a granel, carne en bandeja, aves a granel, pescado a granel, pescado envasado y carne picada, embutidos cocidos, loncheados, mantequillas, leche fresca, platos preparados, zumos refrigerados, salazones y ahumados, semiconservas de pescado, fruta pelada y verdura troceada.
- Los de Tipo 2 que son aquellos que necesitan una temperatura de conservación comprendida entre 1 y 8° C. Los productos del Tipo 2 son los quesos, yogures, postres lácteos, embutidos curados y natas pasteurizadas.
- Los de Tipo 3 que son aquellos que necesitan una temperatura de conservación comprendida entre 8 y 12° C. Los productos del Tipo 3 son las natas esterilizadas y UHT, anchoas en semiconserva y margarinas.
- Los de Tipo 4 que son aquellos que necesitan una temperatura de conservación comprendida entre 10 y 14° C. Los productos del Tipo 4 son la fruta y verdura y bollería. Este grupo es compatible con el grupo del Tipo 3.
- Los de Tipo 5 que son aquellos que necesitan una temperatura de conservación comprendida entre 12 y 16° C. Los productos del Tipo 5 son el chocolate y las galletas con cobertura.
- Los alimentos congelados y ultracongelados son helados y aquellos alimentos donde la mayor parte de su agua libre se ha transformado en hielo, en estos casos la temperaturas de conservación ha de ser estable y mantenerse en todas las partes del producto a -18 °C o menos.

En cuanto a las fluctuaciones máximas recomendadas tanto para productos refrigerados como congelados se permiten que estas alcancen en el transporte hasta + 3° C durante breves momentos de tiempo.

También se nos mencionan las especificaciones generales que deben tener los instrumentos para la medida y el control de la temperatura, donde resaltan las siguientes:

- El tiempo de respuesta deberá alcanzar el 90% de la diferencia entre la lectura inicial y la final en 3 minutos (T90).
- El instrumento deberá tener una precisión como mínimo de +/- 0,5 °C, dentro del rango de trabajo, que se recomienda esté entre -20 °C a + 30 °C.
- La precisión de las mediciones no podrá ser modificada en más de 0,3 °C por la temperatura ambiente dentro de la gama comprendida entre -20 °C y + 30 °C.
- La resolución del resultado del instrumento deberá ser de 0,1 °C.

4.2 Sensórica

4.2.1 Terminología y Definiciones

A continuación se mencionan las definiciones de la terminología más usada cuando nos referimos a sensores:

- Sensor

Pallás Areny et al. (2008), definen sensor (electrónico) como un dispositivo que ofrece una salida eléctrica a partir de una magnitud física o química. Mencionan además que su funcionamiento se basa en las propiedades de los materiales que lo constituyen, las cuales cambian con la magnitud que detectan; o en los cambios en la geometría de un circuito (eléctrico o magnético) debido a la magnitud medida.

Por otro lado, para Fraile Mora et al. (2012), sensor constituye el elemento sensible primario cuya composición varía de alguna forma ante una variable medida, transformando al mismo tiempo estas variaciones en cambios de resistencia eléctrica.

Si bien, otros autores prefieren definir el término sensor como un instrumento que recibe una señal (entrada) de cualquier tipo y luego la transforma en otra distinta (salida), en general y en la mayoría de aplicaciones se suele usar sensores con señal de salida del tipo eléctrico en lugar del tipo mecánico u otro, principalmente porque este tipo de señal permite un mejor procesamiento de la información (Fraile Mora et al., 2012).

- Exactitud (*accuracy* en inglés),

Es la cualidad que caracteriza la capacidad de un instrumento de medida de dar indicaciones que se aproximen al valor verdadero de la magnitud medida (Pallás Areny, 2003). En base a esta definición podemos también decir que el error del sensor vendría a estar dado por esta diferencia entre el valor medido y el valor real.

- Fidelidad (designada a veces como *precision* en inglés americano)

Es la cualidad que caracteriza la capacidad de un instrumento de medida de dar el mismo valor de la magnitud medida, al medir varias veces en unas condiciones determinadas (Pallás Areny, 2003).

- Resolución

Se define a la resolución como el incremento mínimo de la entrada para el que se obtiene un cambio en la salida (Pallás Areny, 2003).

- Histéresis

Es la diferencia en la señal de salida del sensor para una misma señal de entrada aplicada (Pallás Areny, 2003).

4.2.2 Clasificación de los sensores

Los criterios para la clasificación de sensores son diversos y varían en función de las fuentes consultadas, aquí abordaremos tres de ellos, que son los que nos servirán para resaltar la importancia de los sensores utilizados en este trabajo.

4.2.2.1 Según la señal de salida

El primer criterio toma en cuenta la señal de salida y clasifica a los sensores en:

- Digitales, cuando la salida varía en forma de saltos o pasos discretos (Pallás Areny, 2003).
- Analógicos la señal de salida varía a nivel macroscópico, de forma continua (Pallás Areny, 2003).

4.2.2.2 Según el aporte de Energía

La clasificación basada en el aporte de energía, agrupa a los sensores en dos grupos:

- Pasivos: son aquellos que no generan ninguna fuerza electromotriz, necesitando una fuente de alimentación externa para extraer la información de los cambios resultantes (Fraile Mora et al., 2012). Dentro de los sensores pasivos nos encontramos a su vez con varias subcategorías, de las cuales, mencionaremos una de las más utilizadas en lo que a medición de temperatura se refiere, la resistencia eléctrica:

- Resistencia Eléctrica (Sondas)

Son los termómetros donde el elemento principal es una resistencia eléctrica cuyo valor depende de la variación de la temperatura, comúnmente son llamados sondas. Dentro de esto grupo, existen dos tipos de sensores de temperatura:

- Los detectores de temperatura resistivos (RTD por sus siglas en inglés)

Los detectores de temperatura resistivos son simplemente resistencias fabricadas con materiales como el platino, el níquel o el paladio (aleación cobre-níquel), tienen la ventaja de ser estables y de respuesta reproducible durante largos periodos de tiempo, un buen ejemplo de este tipo son las denominadas PT100.

- Los termistores

Los termistores son fabricados con materiales semiconductores como el níquel o el cobalto, y su principal ventaja es la alta precisión (Fraile Mora et al., 2012).

Ambos tipos de sensores arriba mencionados presentan la desventaja de ser muy caros y requerir una fuente de alimentación externa.

- **Activos:** son aquellos que en su funcionamiento generan fuerza electromotriz, por consiguiente no necesitan ninguna fuente de alimentación externa (Fraile Mora et al., 2012). Dentro de este grupo también mencionaremos a los sensores comúnmente más utilizados para medir la temperatura, los termopares y los de circuito integrado:

- Los termopares.

Estos dispositivos eléctricos, consisten esencialmente en dos hilos metálicos diferentes, puestos en contacto térmico. Su funcionamiento se basa en que la magnitud de la fuerza de difusión está controlada por la temperatura de la unión del termopar, así la fuerza electromotriz generada en la unión nos dará una medida de la temperatura (Fraile Mora et al., 2012). Para medir esta fuerza se suele conectar un voltímetro al termopar. La desventaja de este grupo es que necesita de una temperatura de referencia para que la medida sea más precisa y como mayor ventaja podemos mencionar que su respuesta es muy rápida.

- Circuito Integrado (I.C Sensors)

Por ultimo mencionaremos una categoría que agrupa a la mayoría de sensores de temperatura de bajo coste, que a su vez son los de uso comercial más extendido y los de mayor desarrollo en los últimos años, estos son los sensores de circuitos integrados (I.C Sensors por sus siglas en ingles).

Para su fabricación se emplean elementos como los diodos y transistores, la idea es alimentar estos componentes activos con una corriente directa constante (Fraile Mora et al., 2012). Como principal ventaja de estos últimos resaltan su bajo coste y su reducido tamaño.

La clasificación de los sensores según el aporte de energía, descrita párrafos arriba se resume en la siguiente figura (ver Figura 1):

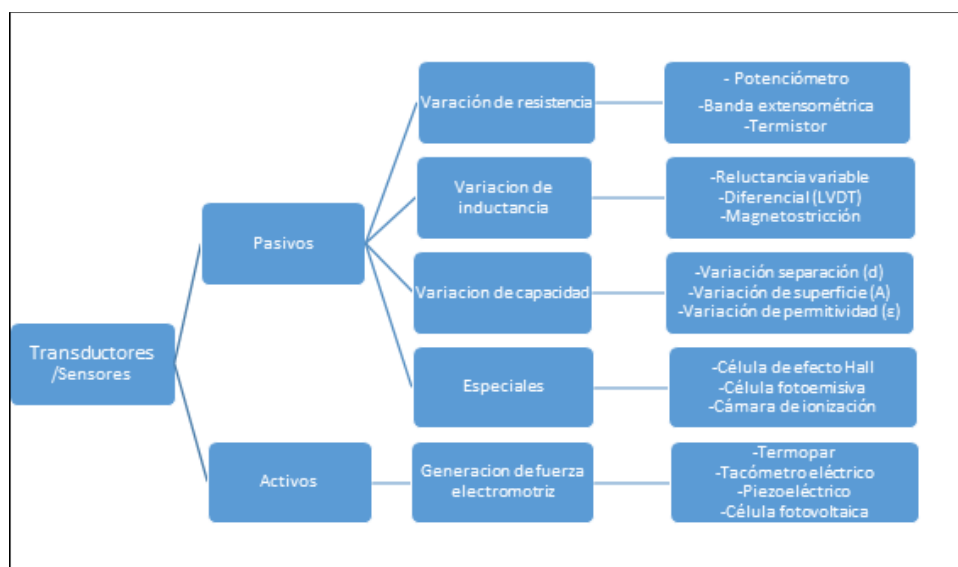


Figura 1. Clasificación de los Transductores/Sensores según el aporte de Energía.
Fuente: Modificado de Fraile Mora et al. (2012).

4.2.2.3 Según el tipo de comunicación

Según su capacidad de comunicación diferenciamos entre los sensores inalámbricos y los sensores alámbricos.

- Inalámbricos

Son aquellos que transmiten la información (data) mediante señales de radiofrecuencia, microondas, satélites, bluetooth, infrarrojo u otros similares (Arias Guadarrama, 2005), por lo que no requieren de la presencia de cables. Dentro de este grupo, la tecnología RFID (Radio Frequency IDentification), es de las más usadas en los sensores de temperatura y humedad durante la supervisión de procesos debido a que pueden ser leídas a través de las mercancías o inclusive sin ser vistas (Ruiz-Garcia et al., 2009).

- Alámbricos

Son aquellos que envían la información conectados por algún tipo de cable, el cual actúa como medio de transmisión por donde pasa la data de un dispositivo a otro. En esta categoría destacan los loggers (alámbricos), que son dispositivos de almacenamiento de datos que integran sensores (Fraile Mora et al., 2012).

4.3 Comportamiento dinámico

Por lo general, los sistemas de instrumentación, tienen que desenvolverse en situaciones dinámicas pues en la mayoría de casos prácticos, es difícil mantener la temperatura a un nivel constante durante largos periodos de tiempo. En particular, en los procesos involucrados en la cadena de frío, los valores de temperatura y humedad registrados en diferentes localizaciones de recintos refrigerados son heterogéneos, como consecuencia de la poca uniformidad del flujo de aire generado por el equipo de frío (Correa Hernando & Barreiro Elorza, 2015). Esto conlleva, a que los sensores utilizados para el control y supervisión de la temperatura, pueden desenvolverse de manera óptima bajo regímenes dinámicos.

Fraile Mora et al. (2012), hablan de funcionamiento o régimen dinámico cuando el estímulo de entrada varía, de forma periódica o no, a frecuencias altas. Dichas relaciones dinámicas deben examinarse generalmente usando ecuaciones diferenciales o integrodiferenciales.

Dentro de este sistema de trabajo, conocer el tiempo de repuesta es probablemente la característica dinámica más importante a la hora de calificar la aptitud de un sensor, pues es un parámetro que nos indica que tan rápido se puede detectar un cambio en la variable medida (Pallás Areny, 2003).

El estudio del tiempo de respuesta de un sensor se puede realizar aplicando a la entrada una magnitud variable conocida, esta puede ser en forma de rampa, escalón, impulso o periódica, la elección de alguna de ellas estará en función del tipo de sensor, en el caso

de los que miden temperatura es relativamente sencillo someterlos a cambios bruscos de temperatura a manera de escalones o rampas.

La descripción matemática de este tipo de comportamiento asume que la entrada y la salida se relacionan según una ecuación diferencial lineal invariante en el tiempo, con ello se consigue una relación general entre entrada y salida. El estudio de cada señal de entrada aplicada al sensor, puede hacerse de acuerdo a la función de transferencia que las describe, normalmente no es necesario emplear modelos de orden superior a dos (Pallás Areny, 2003).

En un sistema de primer orden hay un elemento que almacena energía y otro que la disipa (Pallás Areny, 2003). La relación entre la entrada $x(t)$ y la salida $y(t)$ viene dada por la ecuación diferencial siguiente:

$$a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = x(t)$$

Ecuación 1. Comportamiento de un Sistema de Primer Orden.

Donde: a_1 y a_0 son constantes

Su correspondiente función de transferencia es la que se muestra a continuación:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{k}{\tau s + 1}$$

Ecuación 2. Función de Transferencia en un Sistema de Primer Orden.

Donde $k = 1/a_0$ es la denominada sensibilidad estática, y $\tau = a_1/a_0$ se conoce como constante de tiempo del sistema. La frecuencia propia, ω_c viene dada por $1/\tau$. Por tanto el sistema queda caracterizado por dos parámetros: k para la respuesta estática y ω_c o τ para la respuesta dinámica. En el caso particular de entradas en forma de escalón la ecuación queda de la siguiente manera:

$$y = k(1 - e^{-t/\tau})$$

Ecuación 3. Descripción de un Sistema de Primer Orden con entrada en forma de rampa o escalón.

Es importante señalar que el significado de la constante de tiempo τ no es el tiempo de respuesta hasta llegar a estabilidad sino que es el tiempo que tarda la variable de salida para alcanzar el 63,2% del valor final. Este concepto queda mejor explicado con la siguiente gráfica (ver Figura 2), de donde se puede inferir que el tiempo de respuesta hasta la estabilidad estará dado por 5 veces τ .

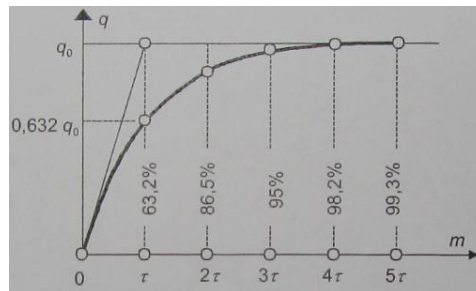


Figura 2. Respuesta de un Transductor ante una entrada en forma de escalón. Fuente: Fraile Mora et al. (2012).

4.4 Supervisión de la Cadena de Frío

El uso de dispositivos inalámbricos que incorporan sensores para el registro de temperatura está siendo ampliamente utilizado para el control y supervisión de las temperaturas consigna en el transporte de alimentos, debido a su bajo coste y al poco espacio que ocupan dentro de un contenedor. Además de éste uso, cada vez es más frecuente encontrar industrias alimentarias que incorporan sensores de temperatura dentro del control de sus procesos o en sus almacenes, debido a su probada eficacia.

Por ejemplo Montoya Londoño (2009) utiliza Termo resistencias PT-100 como sensores de temperatura dentro de los almacenes de refrigeración de una Planta de Derivados Lácteos, los cuales a su vez fueron conectados a un sistema de adquisición de datos para obtener los valores de temperatura en tiempo real además de registrarlos. Con ello demostró la ventaja que tiene el conocimiento y control de los datos, ya que revelan los cambios de temperatura debido a los distintos factores y agentes que intervienen en el proceso de almacenamiento del queso, pudiendo actuar en el momento oportuno y corregir los posibles fallos en la cadena de frío.

Sin embargo, aún hoy en día, la información que se tiene sobre el comportamiento dinámico de sensores es escasa e inexacta (Badia-Melis et al., 2014), siendo importante desarrollar investigaciones dirigidas a aumentar el conocimiento en este campo.

A partir de esta premisa resulta conveniente revisar los trabajos y/o publicaciones enfocadas a aumentar el conocimiento en el campo de la caracterización y la aplicación de sensores de temperatura en la cadena de frío, explicándose a continuación brevemente algunos de ellos:

Pallás Areny y Polo (2013), exploran y revisan las posibilidades que tiene la aplicación de sensores a lo largo de la cadena de suministro de alimentos. Dan una noción amplia sobre las ventajas y desventajas del uso de redes de sensores alámbricos e inalámbricos así como sus posibles aplicaciones a procesos alimentarios, que van desde el monitoreo ambiental en campo hasta el control y supervisión en la distribución de productos. Destaca sobre manera la conclusión a la que llega después de revisar varias tecnologías,

la cual es que la identificación por radiofrecuencia (RFID) es una de las tecnologías candidatas para funciones de identificación, trazabilidad y control de la cadena del frío.

Entrando a explorar las aplicaciones de los sensores de temperatura durante la cadena de frío, encontramos que Armstrong G et al. (2012), utilizaron termómetros digitales que permiten su introducción en el producto (Long stem thermometer®), para evaluar la temperatura durante el transporte de cecina (carne deshidratada), observando que la ruptura de la cadena de frío se produce en el momento en que se entregan los productos al local de venta minorista. Estas subidas de temperatura superaron los 2° C sobre el límite permitido y no sólo se produjeron cuando se entregan los productos, sino que una vez puestos en vitrina se observaron nuevas subidas de la temperatura de almacenamiento.

Por otro lado Jimenez-Ariza et al. (2012), utilizaron una red multidistribuida de sensores instalada en un contenedor frigorífico, la cual, estaba constituida por 43 Tarjetas Rfid TempTrip, que incorporan un sensor de temperatura. Con esta red de sensores lograron supervisar el transporte de limones desde Uruguay hasta España, encontrando que el promedio de las temperaturas estuvo 2,66 °C por encima de la temperatura consigna, variación que está muy por encima de los ± 0.5 °C generalmente aceptados en los grandes contenedores para el transporte de larga distancia de alimentos frescos.

Tres años más tarde Jimenez-Ariza et al. (2015), instalaron una red multidistribuida de sensores de temperatura del tipo Turbotag (mismo sensor utilizado en el presente TFM), durante el transporte de un contenedor de “blueberries” que viajaba de Uruguay a Italia. Sus resultados muestran que la temperatura estuvo en promedio 0.58°C por encima de la consigna, también es oportuno mencionar que con los datos obtenidos y posteriormente analizados fueron capaces de identificar el proceso de descarche del equipo de refrigeración así como la apertura y cierre de puertas durante el transporte.

En cuanto a la caracterización del comportamiento dinámico de los sensores de temperatura, mencionamos la publicación de Badia-Melis et al. (2014), donde abordan la problemática de la caracterización dinámica de los sensores de temperatura, mediante la evaluación de dos módulos Nlaza (con y sin el sensor expuesto), dos tarjetas Turbotag T-700 (con y sin el sensor expuesto), dos tarjetas Turbotag T-702 (con y sin el sensor expuesto) y finalmente un sensor Crossbow Iris. El salto térmico probado en su trabajo fue de 30°C, partiendo en una temperatura de 5°C y finalizando en 35 °C. Sus resultados muestran el efecto altamente significativo que tiene el encapsulado de los sensores sobre los tiempos de respuesta, llegando a ser entre tres y seis veces mayor en los sensores con cobertura.

Por último, y siguiendo con esta línea, nos referiremos al trabajo realizado por Brecht et al., (2011), donde utilizaron, entre los dispositivos de control y registro de temperatura, el sensor CaenRfid sin sonda, mismo sensor utilizado en el presente trabajo. En el

ensayo experimental se sometió a los sensores a rangos de temperatura que iban desde los -35 °C a 60 °C, con cambios bruscos de una gradiente de 30 minutos entre sus más altas y más bajas temperaturas, si bien el tiempo de respuesta no se analizó, la exactitud (accuracy) del sensor si fue evaluada obteniendo un error estándar medio de 0.30°C, una desviación estándar de 0,52°C y un coeficiente de correlación (r) con respecto al sensor de referencia de 0.9988.

Un resumen de estos trabajos puede encontrarse en la Tabla 2 en el apartado de antecedentes y en la Tabla 1 que se expone a continuación. Los temas que se abordan en estas publicaciones (ver Tabla 1) son los relacionados con las aplicaciones de sensores en etapas que van desde el control de la temperatura en procesos alimenticios hasta el transporte y almacenamiento de alimentos.

Tabla 1. Artículos Publicados relacionados con el TFM.

Artículos relacionados con el Trabajo Fin de Master				
Título	Autores	Objetivo	Conclusiones	Relación con el Trabajo Fin de Master
Remote Environmental Monitoring And Diagnostics In The Perishables Supply Chain Phase I	Brecht, Jeffrey K.; Émond, Jean Pierre; Nunes, Maria Cecilia; Sims, Charles A.; Obadasi, Asli; Uysal, Ismail	Demostrar que la aplicación de nuevas tecnologías, incluyendo sensores de temperatura y monitoreo mediante radio frecuencia (RFID), permite calcular la vida útil de los alimentos en tiempo real, basandose en el historial térmico de almacenamiento y transporte.	El uso de sensores inalámbricos de temperatura, control remoto (RFID), algoritmos y diagnósticos, demostró que la vida útil de los alimentos se puede calcular de forma automática en tiempo real utilizando modelos web informáticos	Evaluación de diferentes tecnologías sensores para el registro y control de temperatura.
Evaluación de la Cadena de Frío En Cinco Fábricas de Cecinas y Su Implicancia en el Recuento Microbiológico	Armstrong G. Waldo; Quintana D. Luis; Chesta S. Verónica	Evaluar el funcionamiento de la cadena de frío en fábricas de cecinas y determinar si se puede relacionar la ruptura de la cadena de frío con un aumento en la carga microbiológica en los alimentos	Se observa que existen períodos en los que las temperaturas superan los límites establecidos	Evaluación de la cadena de frío mediante sensores
Redes de Sensores Aplicadas Al Control De Procesos Agroalimentarios	Pallàs Areny Ramon; Polo José	Dar una visión panorámica de las redes de sensores, alámbricas e inalámbricas, identificando las ventajas e inconvenientes de las redes así como sus posibilidades de uso en la industria agroalimentaria	La identificación por radiofrecuencia (RFID) es una de las tecnologías candidatas para funciones de identificación, trazabilidad y control de la cadena del frío.	Uso de redes de sensores para el registro y control de temperatura
Monitoreo y Visualización de Temperaturas en el Área de Generación de Frío de La Planta de Derivados Lacteos Colanta San Pedro de los Milagros	Montoya Londoño Johnatan	Implementar un sistema de monitoreo de Temperatura que incluya sus registros, con el fin de asegurar la calidad de los productos y el buen funcionamiento de los equipos	La selección de los equipos de medición de temperatura deben hacerse teniendo en cuenta los rangos de medida requeridos, la precisión y sensibilidad, las normas sugeridas y el ambiente al cual estarían expuestos.	Uso de sensores para el registro y control de temperatura

5 ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

5.1 Antecedentes

El equipo de investigación del Laboratorio de Propiedades Físicas y Técnicas Avanzadas en Agroalimentación (LPF-TAGRALIA), del departamento de Ingeniería Agroforestal de la Universidad Politécnica de Madrid, ha desarrollado y elaborado proyectos de Investigación relacionados con el comportamiento dinámico de sensores y la supervisión y monitoreo de gradientes de temperatura a través de su uso. Algunos de estos trabajos publicados y que tienen relación con el presente TFM (ver Tabla 2) son los presentados por: (Badia-Melis et al., 2014); (Correa et al., 2014); (H. T. Jimenez-Ariza et al., 2015) y (T. Jimenez-Ariza et al., 2014).

Tabla 2. Artículos Publicados (LPF-TAGRALIA) en relación con el TFM.

Artículos relacionados con el Trabajo Fin de Master				
Título	Autores	Objetivo	Conclusiones	Relación con el Trabajo Fin de
Assessing the dynamic behavior of WSN motes and RFID semi-passive tags for temperature monitoring	Badia-Melis,R.; Garcia-Hierro,J.; Ruiz-Garcia,L.; Jimenez-Ariza,T.; Robla Villalba,J.I.; Barreiro,P	Evaluar el comportamiento dinámico de sensores inalámbricos con y sin cobertura en saltos de temperatura entre 5°C, 23°C y 35°C	El tiempo respuesta dinámico de los sensores esta muy influenciado por el tipo de cobertura o encapsulado que presentan.	Comportamiento dinámico
The Phase Space as a New Representation of the Dynamical Behaviour of Temperature and Enthalpy in a Reefer monitored with a Multidistributed Sensors Network	Jimenez-Ariza,T.; Correa,E.C.; Diezma,B.; Silveira,A. C.; Zocalo,P.; Arranz, F.J.; Moya-Gonzalez,A.;Garrido-Izard,M.; Barreiro,P.; Ruiz-Altisent,M.	Desarrollar una nueva metodología de analisis de datos basado en la reconstrucción del espacio de fases de la serie temporal de temperaturas.	El diagrama de fases es capaz de revelar la heterogeneidad de los valores de temperatura registrados en las distintas posiciones en el interior de contenedores de transporte de alimentos.	Análisis de datos
Multi-distributed wireless sensors for monitoring a long distance transport in a reefer container	Jimenez-Ariza, H. T.; Correa,E. C.; Diezma,B.; Moya-Gonzalez, A.;Arranz,F. J.; Barreiro,P.	Supervisar los gradientes de temperatura de un contenedor durante un transporte de larga distancia	La temperatura al interior de un contenedor es heterogenea y la metodología del diagrama de fases permite identificar de una manera mas clara estas variaciones	Análisis de datos
Advanced Characterisation of a Coffee Fermenting Tank by Multi-distributed Wireless Sensors: Spatial Interpolation and Phase Space Graphs	Correa, E. C.; Jimenez-Ariza, T.; Barreiro, P.; Diezma, B.; Ruiz-Altisent, M.	Caraterizar los gradientes de temperatura en tanques de fermentacion de café con el suso de sensores de temperatura de bajo coste y aplicar interpolacion espacial y diagramas de fase para la interpretacion de los datos.	El uso de la metodología de la interpolacion espacial y diagramas de fases permite caracterizar e identificar cuantitativamente el comportamiento de la temperatura durante la fermentación.	Analisis de datos

También es conveniente mencionar que al desarrollar el trabajo experimental en colaboración con el Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos y Nutrición (ICTAN), Centro de Investigación que cuenta con una amplia variedad de cámaras refrigeradas térmicamente controladas, ha sido importante apoyarse en su experiencia investigadora. Son especialmente influyentes, las líneas de investigación concernientes a la evaluación de la seguridad y calidad de los alimentos y sus constituyentes. Dentro de estos trabajos destacamos los referidos a la importancia que tiene la supervisión y el control de las temperaturas en los procesos de producción y transporte de alimentos para asegurar su calidad e inocuidad (ver Tabla 3). Claro ejemplo de ello, son los artículos publicados por Arias Carrillo et al., (2009) y Domínguez Alonso et al., (2008), donde el Consejo Superior de Investigaciones Científica (CSIC), por medio del ICTAN, han apoyado al desarrollo y a la investigación del sector alimentario.

Tabla 3. Artículos Publicados (con participación del ICTAN) en relación con el TFM.

Artículos relacionados con el Trabajo Fin de Master				
Título	Autores	Objetivo	Conclusiones	Relación con el Trabajo Fin de Master
Recomendaciones para la conservación y transporte de alimentos perecederos	Arias Carrillo, José María; Domínguez Alonso, Manuel; García Rodríguez, Carmen	Recopilar algunas recomendaciones de la conservación y el transporte de los alimentos perecederos, que requieren temperatura controlada	Las recomendaciones para el transporte y la conservación de los alimentos no pueden ser constantes en el tiempo, se deben revisar periódicamente y adaptarse a los nuevos condicionantes y tecnologías	Aplicación de tecnología confiable para el control y supervisión del transporte de alimentos
Aplicaciones del frío	Domínguez Alonso, Manuel; García Rodríguez, Carmen; Arias Carrillo, José María	Exponer y analizar las principales aplicaciones del frío y potenciar la búsqueda de otras nuevas animando a cuantos están relacionados con él tema que continúen investigando para resolver algunos problemas pendientes	Requerirá esfuerzos de I+D+i y se deberá potenciar que se resuelvan los problemas que toda aplicación industrial del frío puede producir.	Importancia del monitoreo, supervisión y control de las temperaturas con equipos adecuados

5.2 Objetivos

El Trabajo Fin de Máster tiene dos objetivos fundamentales:

- 1.- Evaluar comparativamente la respuesta dinámica de los sensores de temperatura integrados en cuatro (04) tipos de dispositivos de adquisición de datos, sometidos a distintas rampas de temperatura.
- 2.- Determinar la aptitud de cada dispositivo evaluado para el control y supervisión de los distintos rangos de temperatura que se podrían encontrar a lo largo del transporte y distribución de productos alimenticios según la normativa y recomendaciones actuales.

6 MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Materiales

Los materiales relacionados con la sensórica fueron provistos LPF-TAGRALIA. En cuanto a lo referente a las Cámaras de Refrigeración, el Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos y Nutrición (ICTAN), mostró la mejor disposición para su uso y disponibilidad.

6.1.1 Sensores de Temperatura

La mayor parte de los sensores de temperatura utilizados para la realización del presente trabajo son los del tipo circuito integrado, debido a las ventajas que ofrece con respecto a los otros grupos. Además de ello, estos sensores, presentan un dispositivo de registro de datos (data logger) integrado, lo que lo que les confiere una mayor versatilidad en sus aplicaciones pues permite la supervisión y control de la temperatura a través del historial térmico. Además de los del tipo circuito integrado, uno de los sensores utilizados emplea una sonda externa del tipo resistencia eléctrica.

Cuatro (04) tipos de sensores de temperatura comerciales, cada uno integrado en diferentes dispositivos de adquisición de datos, han sido utilizados:

1. Tarjetas TurboTag T-700B (Sealed Air, Carolina del Norte, EE. UU.)

Sensor de temperatura integrado en un dispositivo de adquisición de datos que permite almacenar hasta 702 valores, su tamaño es similar al de una tarjeta de crédito (ver Figura 3). La transferencia de datos puede hacerse por vía alámbrica usando un pequeño dispositivo USB de escritorio (ver Figura 3) para conectarlo al ordenador y corriendo el programa “Session Manager”, proporcionado por el fabricante Sealed Air, o por vía inalámbrica, usando su sistema de radio frecuencia (RF).



Figura 3. (a) Tarjeta Turbotag. (b) Lector de Escritorio DR-1 para Turbo Tag.

2. Ibutton DS1923 (Dallas Semiconductor, Texas, EE. UU.)

Sensor de temperatura y humedad integrado en un dispositivo de adquisición de datos del tamaño de una pila de reloj (ver Figura 4). Permite almacenar hasta 4096 valores de temperatura y humedad de forma independiente. La transferencia de datos y la configuración de los sensores se hace por vía alámbrica conectando el ibutton al ordenador por medio de su lector (ver Figura 4) y ejecutando el programa “1-Wire®/Ibutton®” proporcionado por el distribuidor.



Figura 4. (a) Ibutton. (b) Lector de Escritorio para Ibutton.

3. Temptale TT4 Modelo Tradicional (Sensitech, Massachusetts, EE. UU.)

Sensor de temperatura integrado en un dispositivo de adquisición de datos de tamaño similar al de un teléfono móvil (ver Figura 5). Logra almacenar hasta 1920 datos de temperatura. La transferencia de valores registrados se hace por vía alámbrica conectando el sensor al ordenador mediante un lector (ver Figura 5), el software “TempTale Manager”, necesario para la descarga y configuración lo proporciona el fabricante.



Figura 5. (a) Sensor Temptale. (b) Lector para Temptale.

4. CaenRfid con sonda A927ZET (CaenRfid, Viareggio, Italia)

Dispositivo con doble sensor de temperatura, uno colocado en el interior del armazón del aparato y el otro dispuesto en la sonda externa (ver Figura 6). Su capacidad de almacenamiento es de 1020 datos, de forma independiente, tanto en el sensor interno como en la sonda. La transferencia del registro de temperatura así como la configuración del sensor se hace tanto de forma alámbrica, conectándolo al ordenador por medio del lector (ver Figura 6), como de forma inalámbrica y ejecutado el software “Templog” proporcionado por el fabricante.

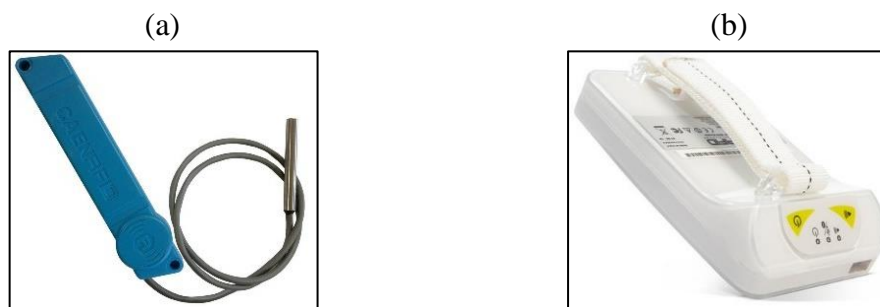






Figura 6. (a) Sensor CaenRfid con sonda. (b) Lector CaenRfid.

A continuación se presenta una tabla (Tabla 4) con las características más importantes de los sensores utilizados, la cual ha sido elaborada en base a las fichas técnicas proporcionadas por los fabricantes:

Tabla 4. Principales Características de los Sensores Según Fichas Técnicas.

Características	Sensor TEMPTALE 	Sensor CAENRFID 	Sensor TURBOTAG 	Sensor IBUTTON 
Señal de salida	Digital	Digital	Digital	Digital
Rango de Temperatura (°C)	-30 a +70	- 40 a + 70	T-700: -30 a +40 T-702: -55 a +70	-20 a +85 0 a 100 % HR
Precisión (°C)	± 1,1 (-30 a -18) ± 0.55 (-18 a +50) ± 1,1 (+50 a +70)	± 0,1 (normal) ± 0.75 (máxima)	± 0.5 (normal)	± 0.5 (normal)
Resolución (°C)	0,1	0,1	No especificado	0,5 y 0.0625
Almacenamiento (Datos)	1920	8000	702	4096 o 8192
Intervalo de Muestreo	10 segundos a 02 horas	8 segundos a 18 horas	3 segundos a 175 días	1 segundo a 273 horas
Retraso del Inicio	Min 0 segundos Max 194 días	No especificado	Min 0 horas Max 21 días	Min 0 segundos Max 31 años
Función Alarma	Si	Si	Si	Si
Lector de Humedad	No en este modelo	No en este modelo	No	Si
Batería (vida útil)	SI-pasivos (01 año en función al uso)	SI-pasivos (03 años en función al uso)	SI-pasivos (02 años en función al uso)	SI-pasivos (01 a 10 años en función al uso)
Software y Lector Adicional (características)	Si Exporta: PDF, Excel, Csv	Si Exporta: Text Document	Si Exporta: TTD File, Text Document	Si Exporta: Csv, Excel, Text Document
Comunicación inalámbrica	NO	SI RFID	SI RFID	NO
Tiempo de Respuesta	No especificado	20 minutos (Para alcanzar 90% de un cambio +25°C a +70°C)	No especificado	05 minutos (Para alcanzar 90% de un cambio -1°C a +19.5°C)

6.1.2 Cámaras de Refrigeración

El ICTAN cuenta con una amplia baterías de cámaras de refrigeración térmicamente controladas, 34 en total, de las cuales se utilizaron 05 para la realización del presente TFM, las temperaturas consigna fueron modificadas en función de las rampas de temperatura que se deseaba probar. Todos los ambientes cuentan con estanterías en el interior que sirven para colocar distintos productos (ver Figura 7), sin embargo para la realización de los ensayos se procuró que estas estuvieran vacías para así no afectar la transferencia de calor a los sensores. Además de ello, todas las cámaras cuentan con sondas del tipo resistencia eléctrica (PT100), que miden y registran los valores de temperatura del interior (ver Figura 7) en intervalos de tiempos de 05 minutos, los cuales son almacenados y guardados en un servidor central.

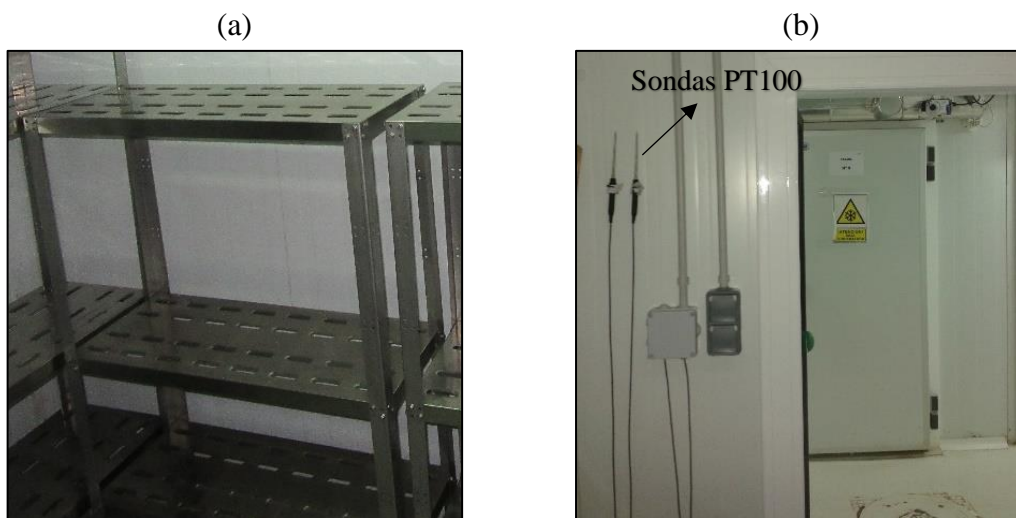


Figura 7. (a) Estantería vacía de una de las cámaras. (b) Ubicación de la sonda (PT100) al interior de una cámara.

En concreto las cámaras de las que se hizo uso fueron las siguientes:

- Cámara N°15: Cámara con una superficie de 5.21 m² y un volumen de 11.46 m³, está provista de un evaporador Glicol de 50 Hz y líquido refrigerante Temper - 40. La ubicación de la sonda de registro de temperatura se encuentra entrando a la derecha de la puerta.
- Cámara N°21: Cámara con una superficie de 12 m² y un volumen de 26.40 m³, está provista de un evaporador Glicol de 50 Hz y líquido refrigerante Temper - 40. La ubicación de la sonda de registro de temperatura se encuentra entrando a la izquierda de la puerta.
- Cámara N°26: Cámara con una superficie de 3.90 m² y un volumen de 10.53 m³, está provista de un evaporador Glicol de 50 Hz y líquido refrigerante Glicol de Propileno 30%. La ubicación de la sonda de registro de temperatura se encuentra entrando a la izquierda de la puerta.
- Cámara N°30: Cámara con una superficie de 5.21 m² y un volumen de 11.46 m³, está provista de un evaporador Glicol de 50 Hz y líquido refrigerante Temper -

40. La ubicación de la sonda de registro de temperatura se encuentra entrando a la derecha de la puerta.
- Cámara N°33: Cámara con una superficie de 4.45 m² y un volumen de 12.02 m³, está provista de un evaporador Glicol de 50 Hz y líquido refrigerante Glicol de Propileno 30%. La ubicación de la sonda de registro de temperatura se encuentra entrando a la izquierda de la puerta.

6.2 Métodos

Se realizaron dos series de ensayos por cada ensayo 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 regresar los sensores a la cámara inicial durante 30 minutos más, haciendo 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 lleguen a estabilidad antes de hacer el cambio.

Las temperaturas de los ensayos, fueron propuestas en base a las recomendaciones AECOC para la logística (RAL) que regula el transporte y distribución (cadena de frío), de los alimentos destinados al consumo humano. La definición de cada tipo de alimento así como las temperaturas recomendadas para su transporte se encuentran en el apartado de revisión bibliográfica. Sin embargo, para explicar y justificar la elección de las temperaturas de los ensayos, se muestra la *Tabla 5*. Este cuadro, toma en cuenta por un lado, que las recomendaciones admiten con respecto a la temperatura mínima y máxima de almacenamiento de cada tipo de producto una tolerancia de +3°C durante el transporte de producto y por otro que los trabajos revisados muestran oscilaciones de temperatura mucho más altas entre 8°C y 10°C en el transporte refrigerado de productos a larga distancia, del orden de -2°C y +7°C con respecto a la consigna.

Teniendo en cuenta todas las consideraciones mencionadas líneas arriba, las temperaturas finalmente seleccionadas para los ensayos son las que se muestran en la *Tabla 6*. En el cuadro puede notarse como se consideró el mismo salto térmico para los alimentos del tipo 1 y 2 al considerarse muy próximas las temperaturas, del mismo modo que los alimentos del tipo 3 y 4. Caso contrario ocurrió en los alimentos del tipo 5 y los congelados y ultracongelados, donde sus temperaturas recomendadas no se agruparon con otros tipos de alimentos. Adicionalmente, un ensayo que abarque los rangos extremos (positivo y negativo) utilizados, fue incluido en el trabajo experimental.

Tabla 5. Temperaturas de los tipos de Alimentos durante la Cadena de Frío.

Etapa de la cadena de frío	Min	Min+Tol	Max	Max+Tol	Min	Min+Tol	Max	Max+Tol	Min	Min+Tol	Max	Max+Tol	Min	Min+Tol	Max	Max+Tol	Min	Min+Tol	Max	Max+Tol	Min	Min+Tol	Max	Max+Tol	Tª	Tª + Tol
	TIPO 1	TIPO 1	TIPO 1	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 2	TIPO 2	TIPO 2	TIPO 3	TIPO 3	TIPO 3	TIPO 3	TIPO 4	TIPO 4	TIPO 4	TIPO 4	TIPO 5	TIPO 5	TIPO 5	TIPO 5	TIPO 5	TIPO 5	TIPO 5	TIPO 5	Ultra. Cong. + Congelados	Ultra. Cong. + Congelados
Proveedor	0	0	5	5	1	1	8	8	8	8	12	12	10	10	14	14	12	12	16	16	12	12	16	16	-23	-23
Transporte	0	3	5	8	1	4	8	11	8	11	12	15	10	13	14	17	12	15	16	19	12	15	16	19	-20	-17
Almacén	0	0	5	5	1	1	8	8	8	8	12	12	10	10	14	14	12	12	16	16	12	12	16	16	-20	-20
Transporte (a tiendas)	0	3	5	8	1	4	8	11	8	11	12	15	10	13	14	17	12	15	16	19	12	15	16	19	-19	-16
Tienda	0	0	5	5	1	1	8	8	8	8	12	12	10	10	14	14	12	12	16	16	12	12	16	16	-18	-18
Consumidor	0	0	5	5	1	1	8	8	8	8	12	12	10	10	14	14	12	12	16	16	12	12	16	16	-18	-18
Rango de T°		0		8		1		11		8		15		10		17		12		19				19	-23	-16
oscilaciones de -2°C y +7°C en la T° consigna		-2		15		-1		18		6		22		8		24		10		26				26	-25	-9
Variación de Tª	17				19				16				16				16				16					

Nota: Todas las unidades están expresadas en grados Celsius (°C)

Tabla 6. Temperaturas de los Ensayos Realizados.

Numero de Ensayo	Sensores		Numero de Repeticiones	Total de Rampas subida/bajada		Rampas de Temperatura			
	Total de Sensores usados	Sensores de cada tipo		Sub.	Baj.	Tª (°C) A los 0 minutos de Ensayo	Tª (°C) A los 90 minutos de Ensayo	Tª (°C) A los 120 minutos de Ensayo	Salto térmico (°C)
1	3	3*	2	2	2	-20	-10	-20	10
2	4	3*	2	2	2	-2	+18	-2	20
3	4	3*	2	2	2	+6	+24	+6	18
4	4	3*	2	2	2	+10	+26	+10	16
5	3	3*	2	2	2	-20	-20	+26	46

* Se usaron 3 sensores de cada tipo a excepción del sensor TempTale, del que se disponía una única unidad

La frecuencia de adquisición de los datos, fue igual en todos los ensayos, a excepción del ensayo 5, donde se incrementó el intervalo del tiempo, ya que la duración total del ensayo era mayor (ver Tabla 7).

Tabla 7. Frecuencia de Adquisición de datos

Frecuencias de adquisición de datos para los Ensayos 1, 2, 3 y 4				Frecuencias de adquisición de datos para el Ensayo 5		
Capacidad de almacenamiento (datos)	Sensores	Intervalo de Muestreo (segundos)	Tiempo de Muestreo (minutos)	Sensores	Intervalo de Muestreo (segundos)	Tiempo de Muestreo (minutos)
702	TurboTag	12	120	TurboTag	18	180
4096	Ibutton	3	120	Ibutton	3	180
1000	CaenRfid	8	120	CaenRfid	16	180
1920	Temptale	10	120	Temptale	10	180

Los sensores fueron colocados en las cámaras previamente fijados en una barra de metal (ver Figura 8) y enganchados en las estanterías del interior siempre debajo del evaporador, evitando en todo momento el contacto de los sensores con alguna superficie (ver Figura 8), con ello se buscó medir la temperatura del aire y no la de material alguno. Se usaron 03 sensores de cada tipo a modo de repeticiones, a excepción del sensor Temptale, del cual se utilizó uno en cada ensayo debido a la no disponibilidad de más dispositivos de este tipo. Es importante mencionar que los sensores Ibutton no fueron empleados en las rampas que incluían la temperatura de cámara de -20°C , esto debido a que la ficha técnica sitúa su rango de seguridad a esta temperatura y en pruebas preliminares detectaron errores de funcionamiento.



Figura 8. (a) Sensores Fijados en la barra de metal. (b) Sensores colocados en la estantería de una de las Cámaras

6.2.1 Análisis de datos

Todos los datos recopilados de los ensayos serán procesados con rutinas desarrolladas en el programa MatLab 2015 (MathWorks, Massachusetts, EE. UU.), con ellas, principalmente se busca caracterizar el tiempo de respuesta de los sensores para cada una de las rampas y a su vez conocer si cumplen con la normativa española vigente que indica que los sensores utilizados para el control y supervisión de la cadena de frío

deben ser capaces de alcanzar el 90% (T90) de la temperatura final en un tiempo no superior a 03 minutos.

Los datos fueron procesados inicialmente para separar las rampas de subida y bajada, ello se realizó de forma independiente para para cada sensor y ensayo. Posteriormente cada rampa (subida y bajada) es ajustada con una curva exponencial creciente o decreciente para calcular el tiempo en el que se alcanza el 90% del salto térmico. Los cálculos del tiempo de respuesta se basaron en las ecuación del comportamiento de un sistema de primer orden, ya que en los sensores de este tipo hay un elemento que almacena energía y otro que la disipa (Pallás Areny, 2003). La relación entre la entrada y la salida viene dada por la Ecuación 1 y la Ecuación 2 previamente explicadas en el apartado de revisión bibliográfica.

6.2.1.1 Curva de Ajuste exponencial

A partir de las ecuaciones antes mencionadas, se encuentra que la respuesta de un sistema de primer orden cuando se usa saltos de temperatura (rampas) decrecientes, siguen un comportamiento exponencial definido por la ecuación siguiente (Ecuación 4):

$$y = k * x * e^{-t/\tau}$$

Ecuación 4. Comportamiento de un Sistema De Primer Orden en Rampa Decreciente

Y cuando el sistema usa saltos crecientes (excitación) el comportamiento lo define la siguiente ecuación (Ecuación 5):

$$y = k * x * (1 - e^{-t/\tau})$$

Ecuación 5. Comportamiento de un Sistema De Primer Orden en Rampa Ascendente

Las adaptaciones de las ecuaciones arriba mencionadas son las utilizadas por (Badia-Melis et al., 2014), quedando las expresiones matemáticas para el ajuste exponencial de la siguiente manera para saltos ascendentes (ver Ecuación 6) y descendentes (ver Ecuación 7):

$$y = a * \left(1 - e^{-\frac{x}{b}}\right) + c$$

Ecuación 6. Adaptación de las ecuaciones de Primer Orden para una rampa Ascendente

$$y = a * \left(e^{-\frac{x}{b}}\right) + c$$

Ecuación 7. Adaptación de las ecuaciones de Primer Orden para una rampa Descendente

Donde “a” es el salto de temperatura en grados Celsius (°C), “y” es la temperatura (°C) registrada por el sensor a un tiempo (s) “x”, “b” es el parámetro “τ” que viene a ser el

tiempo característico en segundos o tiempo en alcanzar el 63,2% del valor final de la temperatura (Fraile Mora et al., 2012), y “c” es la temperatura (°C) antes de iniciarse el salto térmico en el caso de la curva ascendente y en el caso de la curva descendente “c” es la temperatura final (°C) a estabilización.

El tiempo de respuesta en este trabajo se define como el tiempo hasta que el sensor alcanza la estabilidad a la temperatura consigna del ensayo, que según Fraile Mora et al. (2012), se alcanza para un tiempo igual a $5*\tau$ o lo que es lo mismo a $5*b$.

Todo el proceso del ajuste de las curvas exponenciales se llevó a cabo con el programa MatLab, usando la función *fitmodel* de la librería de ajuste de curvas de la barra de herramientas, la cual optimiza el mejor ajuste, definiendo previamente valores como el punto de partida y los límites superiores e inferiores de cada rampa. La bondad del ajuste del modelo se estima a partir de los valores del coeficiente de determinación (r^2) y la desviación media de la raíz cuadrada (rmse). El “ r^2 ” es una medida estadística que nos indica la representatividad de los datos por parte del modelo, en otras palabras la precisión del modelo. Por otro lado el “rmse” calcula la raíz cuadrada del promedio de las suma de las diferencias cuadráticas entre el valor de Temperatura del modelo y el valor de Temperatura medida por el sensor, en otras palabras este valor nos indica que tanto es la diferencia (en promedio) entre el valor del modelo y el valor medido por el sensor.

Una vez ajustadas las rampas (subida y bajada) con su respectiva curva exponencial (creciente o decreciente), se han calculado los siguientes parámetros adicionales a partir de la curva de ajuste y utilizando la función *solve* de MATLAB, por su interés desde el punto de vista de las recomendaciones de AECOC sobre las características que deberían cumplir los sensores que se emplean en el control de la cadena logística de frío:

- Tiempo (segundos) que tarda el sensor en alcanzar el 90% del salto térmico
- Temperatura al 90% del salto térmico
- Porcentaje (%) del salto térmico alcanzado a los 3 minutos de que se inicie el cambio de temperatura
- Temperatura alcanzada a los 3 minutos de que se inicie el cambio de temperatura.

7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Descripción de la respuesta dinámica de cada sensor

Una vez recopilados y procesados los datos de los sensores con el programa Matlab, se obtuvo la representación gráfica de los mismos, con el fin de identificar sus respectivas rampas (subida y bajada), luego de lo cual, se procedió a separarlas para llevar a cabo el modelizado de los datos, el cual se realizó usando el ajuste exponencial correspondiente (creciente o decreciente). Será en base a esta curva de ajuste de donde se obtendrán los parámetros de bondad del modelo así, los tiempos de respuesta y los valores correspondientes al T90. Este procedimiento se realizó para cada ensayo y para cada sensor; a continuación se presenta un caso tipo de cada sensor que ayudaran a explicar los resultados obtenidos:

- Sensor Temptale:

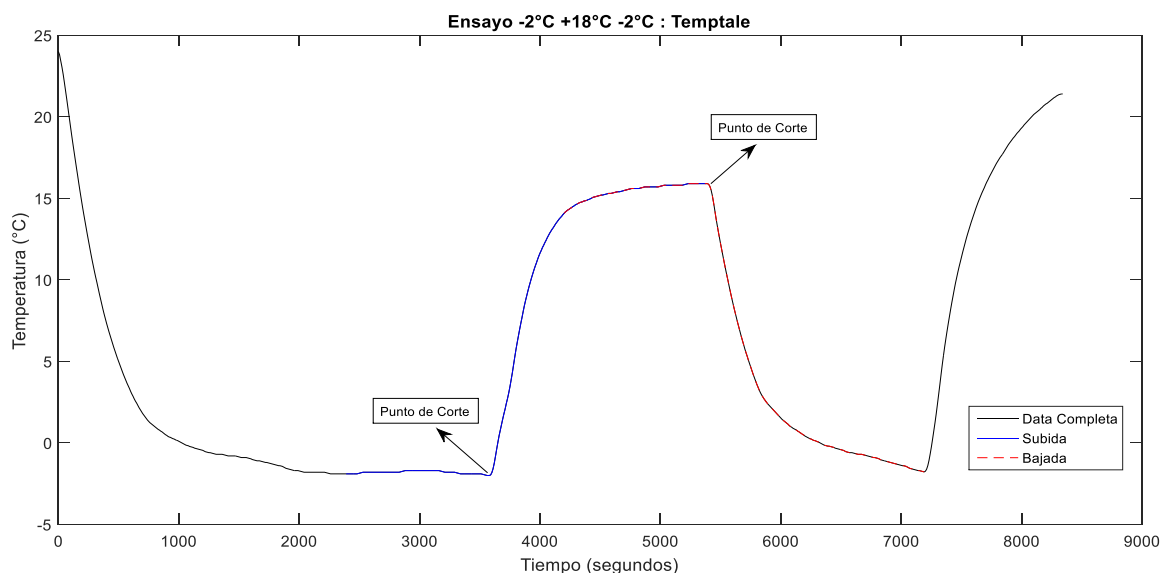


Figura 9. Ensayo $-2^{\circ}\text{C} +18^{\circ}\text{C} -2^{\circ}\text{C}$: Sensor Temptale

En la Figura 9 podemos observar la curva completa del sensor Temptale para el ensayo de -2°C a $+18^{\circ}\text{C}$ a -2°C , nótese que están señalados los puntos de corte, es decir, los valores a partir de los cuales se separó las rampas en subida y bajada, precisamente son estos puntos los correspondientes al cambio de los sensores entre cámaras. Así mismo podemos apreciar claramente las curvas ascendentes y descendentes de la temperatura.

Por otro lado en la Figura 10, se muestra la rampa de subida separada y su respectiva curva de ajuste exponencial ascendente. En la gráfica también se resaltan los puntos que representan los valores del T90 y T3, siendo el primero el correspondiente al tiempo para alcanzar el 90% del cambio de temperatura y el segundo el valor de la temperatura alcanzada en 3 minutos. Por otro lado, la Figura 11 también nos muestra la curva de ajuste exponencial pero para el caso descendente.

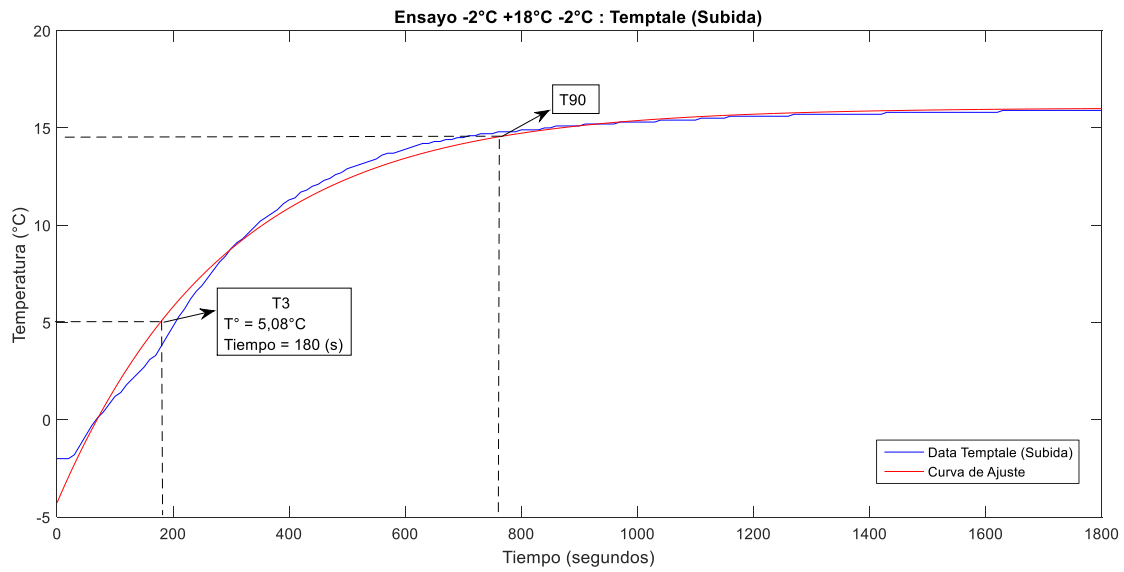


Figura 10. Ajuste exponencial ascendente sobre los datos del sensor Temptale

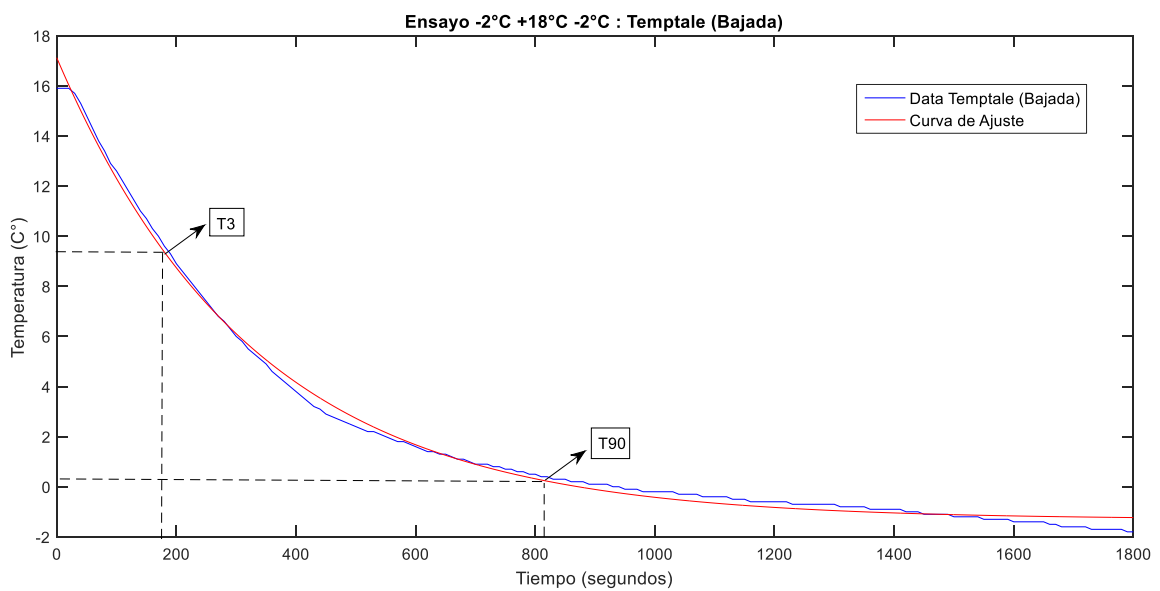


Figura 11. Ajuste exponencial descendente sobre los datos del sensor Temptale

- Sensor Ibutton

Para el caso de los sensores Ibutton, se presenta la Figura 12, donde se aprecia el ensayo completo correspondiente a las temperaturas de +6°C a +24°C a +6°C, los puntos de corte también están señalados así como la identificación de las rampas de subida y bajada.

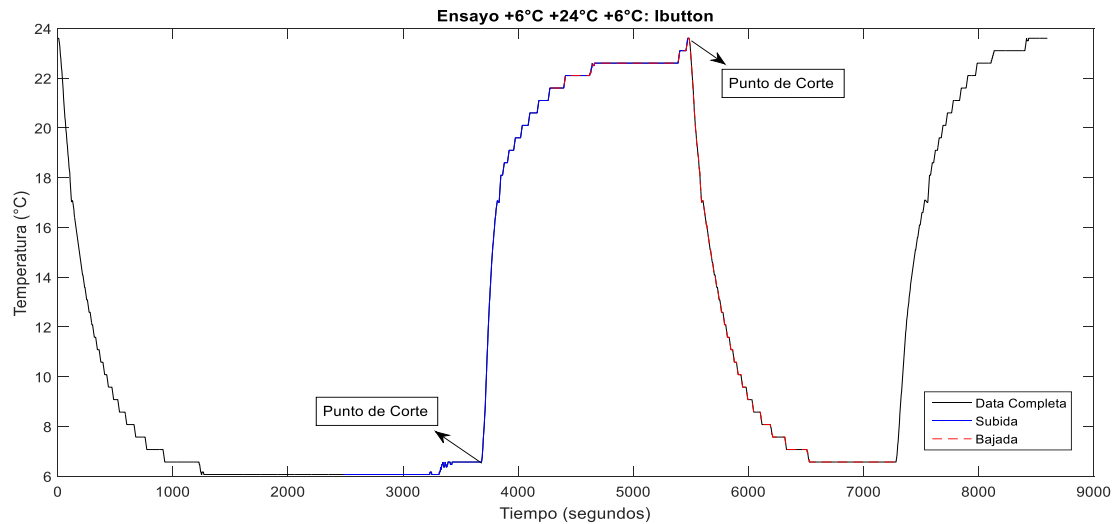


Figura 12. Ensayo +6°C +24°C +6°C: Sensor Ibutton

Los escalones a lo largo de la curva que se observan, son atribuibles a la resolución y/o la frecuencia de adquisición de datos del sensor Ibutton. La resolución de este sensor es de 0,5°C, según la ficha técnica, lo que es 5 veces mayor a la del sensor Temptale por ejemplo, donde no se aprecia este comportamiento. La resolución de 0,5°C nos indica que el sensor solo es capaz de detectar cambios de temperatura de 0,5°C en 0,5°C frente a los 0,1°C de los Temptale.

Seguidamente se muestran la Figura 13 y Figura 14, en las cuales la subida y bajada están separadas y ajustadas con su correspondiente curva exponencial.

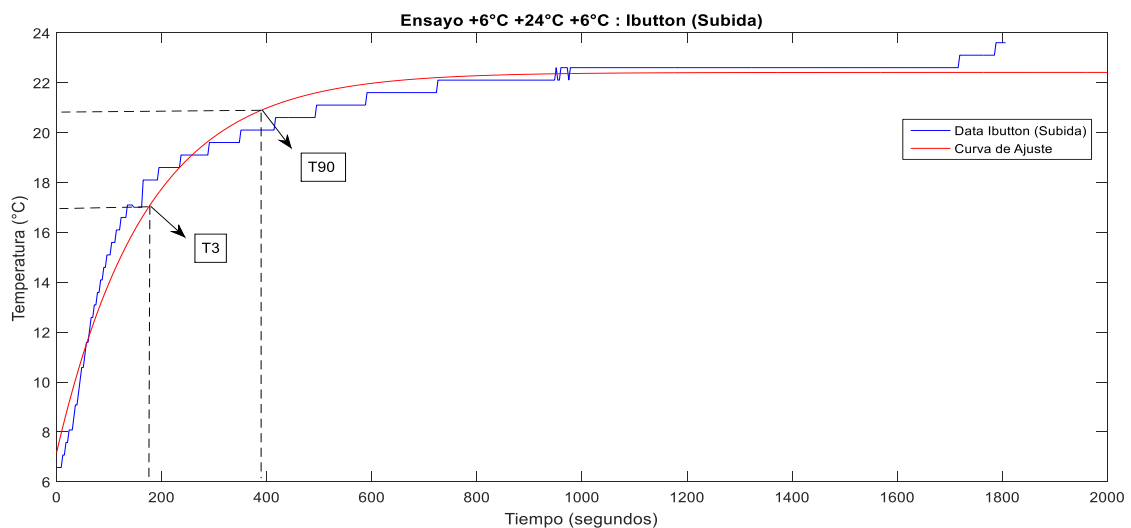


Figura 13. Ajuste exponencial ascendente sobre los datos del sensor Ibutton

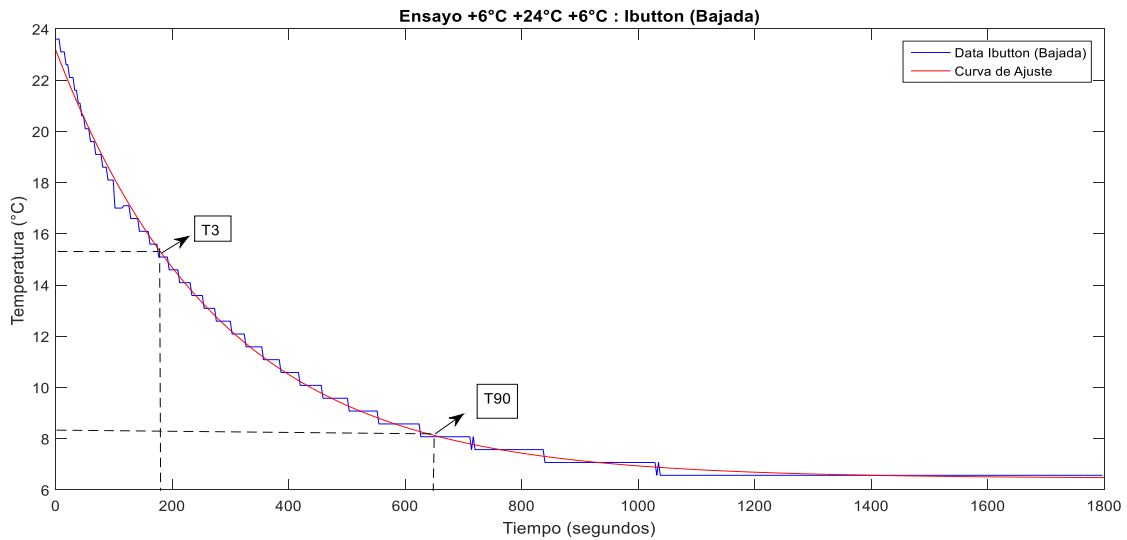


Figura 14. Ajuste exponencial ascendente sobre los datos del sensor Ibutton

- Sensor Caen y Caen Sonda

Para el caso de los sensores Caen y Caen Sonda se muestra la Figura 15, donde se puede ver el ensayo completo de temperaturas $-2^{\circ}\text{C} +18^{\circ}\text{C} -2^{\circ}\text{C}$. Si bien en este tipo de sensor los dos termómetros están integrados en un solo dispositivo, en la práctica se comportan como dos sensores independientes, lo cual también se aprecia en la gráfica. La línea horizontal celeste está colocada para hacer notar que el sensor externo (Caen Sonda), se acerca más a la temperatura consigna de la cámara que el sensor encapsulado (Caen).

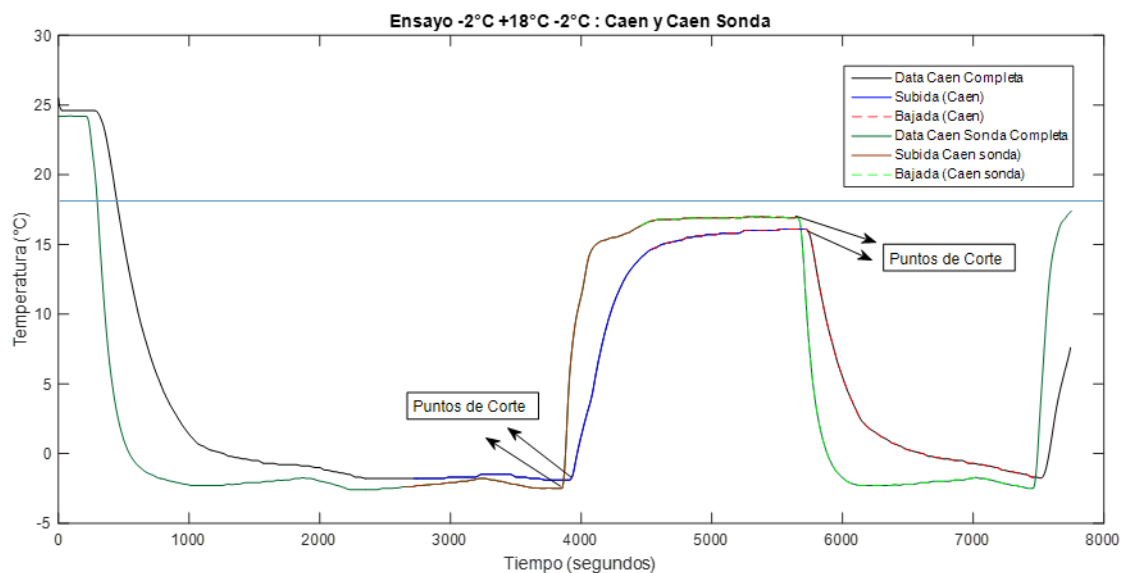


Figura 15. Ensayo $-2^{\circ}\text{C} +18^{\circ}\text{C} -2^{\circ}\text{C}$: Sensores Caen y Caen Sonda

Del mismo modo que en los demás sensores las rampas de subida y bajada han sido separadas para realizar el ajuste exponencial correspondiente, la Figura 16 muestra la curva de ajuste ascendente para el sensor Caen y la Figura 17 la curva de ajuste descendente para el sensor Caen Sonda

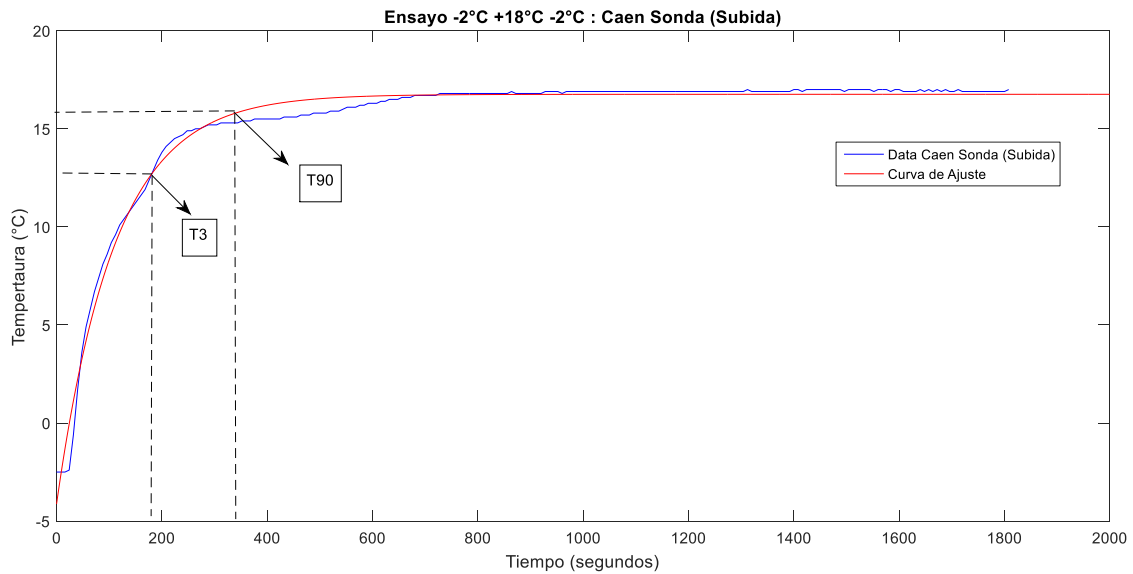


Figura 16. Ajuste exponencial ascendente sobre los datos del sensor Caen Sonda

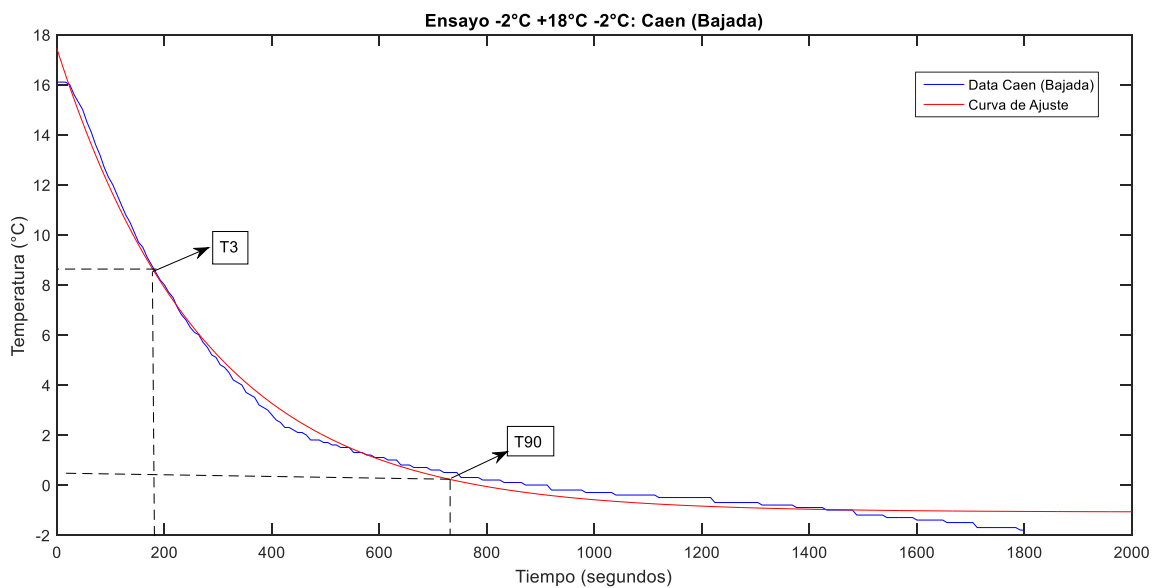


Figura 17. Ajuste exponencial descendente sobre los datos del sensor Caen

- Sensor Turbotag

Para el caso de los sensores Turbotag, en la Figura 18, correspondiente al ensayo de temperaturas -20°C a -10°C a -20°C, se puede notar un comportamiento con particularidades, ya que podemos observar la fluctuación de la temperatura en el momento del cambio entre cámaras. La presencia de esta variación se debe a que la temperatura del pasillo está muy por encima de los rangos de trabajo de este ensayo, dando lugar a la presencia de estos picos “cuernos”.

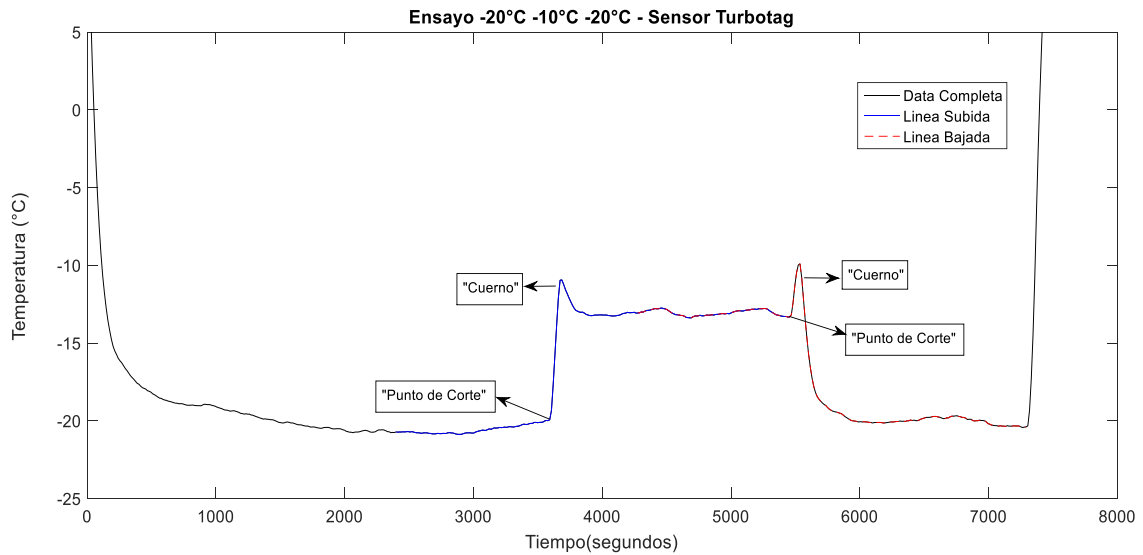


Figura 18. Ensayo -20°C -10°C -20°C: Sensor Turbotag

La aparición de este comportamiento se traduce en un peor ajuste del modelo (r^2 baja), pues todos esos datos registrados quedan fuera de la línea de ajuste exponencial, tanto en la rampa de subida como en la bajada, tal y como se aprecia en las Figura 19 y Figura 20. Esta afirmación quedará mejor detallada cuando presentemos los datos correspondientes a la bondad del ajuste del modelo. Es oportuno mencionar que este comportamiento lo presentan también los sensores Caen Sonda durante el mismo ensayo.

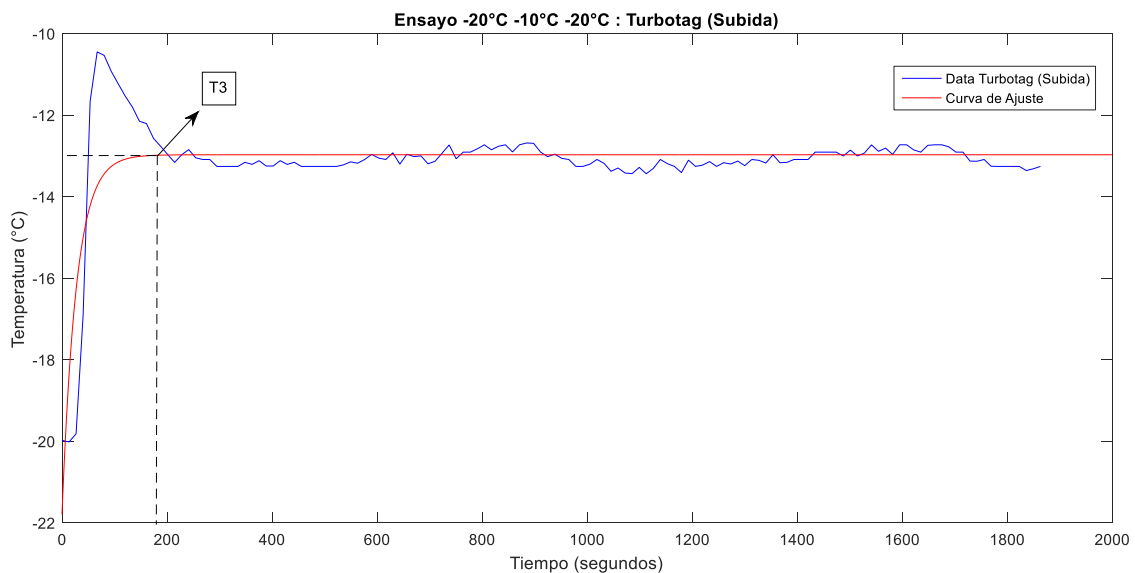


Figura 19. Ajuste exponencial ascendente sobre los datos del sensor Turbotag

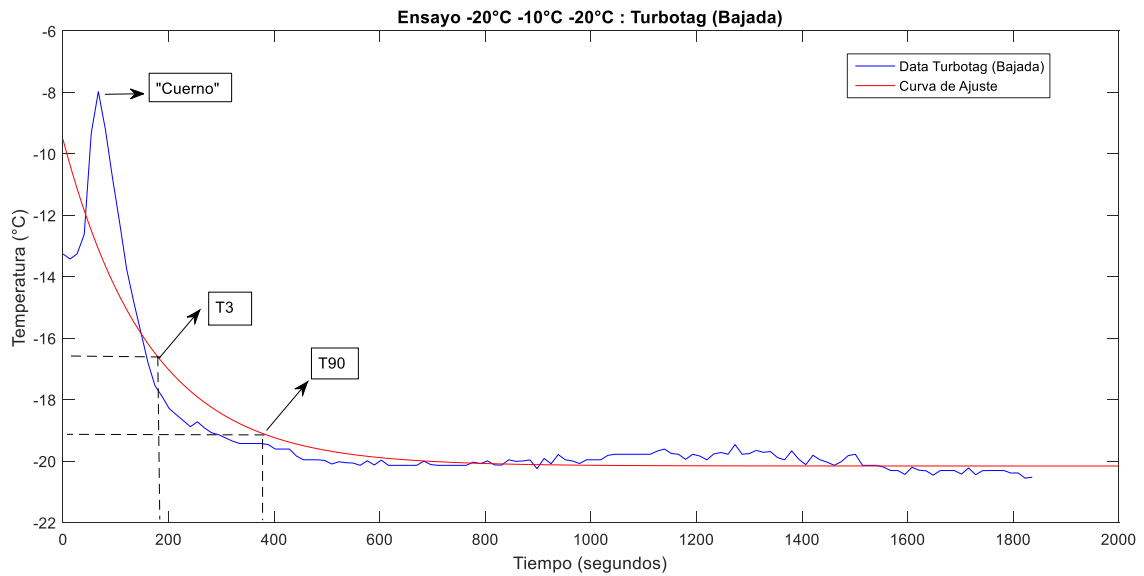


Figura 20. Ajuste exponencial ascendente sobre los datos del sensor Turbotag

7.2 Ajuste del Modelo Exponencial

Una vez realizado el procesado de datos para cada ensayo y sensor, se elaboró la siguiente tabla resumen (ver Tabla 8) que contiene las medias de los parámetros correspondientes a "b", tiempo de respuesta en segundos hasta alcanzar el 63,2% de la temperatura final; el " r^2 ", que nos indicará la representatividad de los datos por parte del modelo; y el "rmse" que expresa la diferencia entre los valores del modelo y los del sensor.

Tabla 8. Resultados obtenidos para los parámetros “b”, “r²” y “rmse”

Sensor	ENSAYO	RAMPA	b (segundos)	Desv. Estandar	r2	Desv. Estandar	rmse	Desv. Estandar
1	1	1	155,00	9,97	0,85	0,02	0,91	0,06
1	1	2	31,99	4,54	0,71	0,11	0,64	0,16
1	2	1	148,40	22,78	0,98	0,01	0,63	0,18
1	2	2	135,96	11,46	0,99	0,00	0,44	0,10
1	3	1	207,87	21,37	0,99	0,00	0,32	0,04
1	3	2	130,55	15,96	0,98	0,00	0,47	0,05
1	4	1	210,08	14,97	0,99	0,00	0,27	0,02
1	4	2	278,25	63,80	0,96	0,02	0,65	0,16
1	5	1	144,09	7,44	0,98	0,00	0,91	0,07
1	5	2	153,70	14,66	0,97	0,00	1,16	0,13
2	1	1	405,49	18,28	0,99	0,00	0,25	0,01
2	1	2	272,58	18,58	0,97	0,02	0,26	0,07
2	2	1	353,61	34,02	1,00	0,00	0,25	0,02
2	2	2	347,25	78,70	1,00	0,01	0,26	0,23
2	3	1	560,10	17,67	1,00	0,00	0,10	0,01
2	3	2	456,15	64,10	0,99	0,01	0,31	0,17
2	4	1	548,72	0,72	1,00	0,00	0,07	0,03
2	4	2	716,88	40,25	1,00	0,00	0,20	0,12
2	5	1	473,14	6,55	1,00	0,00	0,51	0,01
2	5	2	447,49	26,96	0,99	0,00	0,94	0,19
3	1	1	442,34	22,95	0,98	0,00	0,32	0,03
3	1	2	228,51	26,97	0,94	0,03	0,31	0,07
3	2	1	346,97	53,34	1,00	0,00	0,24	0,06
3	2	2	342,78	69,34	1,00	0,00	0,25	0,19
3	3	1	613,04	14,69	1,00	0,00	0,09	0,01
3	3	2	420,85	77,87	0,99	0,00	0,40	0,05
3	4	1	635,08	9,36	1,00	0,00	0,05	0,00
3	4	2	766,41	97,54	0,99	0,00	0,28	0,14
3	5	1	515,97	7,31	1,00	0,00	0,53	0,07
3	5	2	423,55	11,41	0,99	0,01	1,07	0,28
4	1	1	118,61	4,42	0,84	0,01	0,93	0,06
4	1	2	17,80	3,69	0,46	0,07	0,86	0,04
4	2	1	126,42	15,30	0,99	0,00	0,35	0,10
4	2	2	115,81	16,82	0,98	0,01	0,48	0,06
4	3	1	224,56	5,13	1,00	0,00	0,20	0,03
4	3	2	128,50	10,62	0,98	0,01	0,44	0,07
4	4	1	237,43	5,64	0,99	0,00	0,29	0,01
4	4	2	332,55	12,68	0,98	0,01	0,52	0,13
4	5	1	130,36	11,51	0,98	0,00	0,89	0,16
4	5	2	138,77	11,25	0,95	0,01	1,41	0,13
5	1	1	-----	-----	-----	-----	-----	-----
5	1	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----
5	2	1	132,11	14,19	0,98	0,01	0,46	0,15
5	2	2	136,35	5,78	0,99	0,00	0,34	0,07
5	3	1	284,46	10,85	1,00	0,00	0,21	0,06
5	3	2	170,75	12,21	0,97	0,01	0,48	0,09
5	4	1	293,45	4,95	0,99	0,00	0,24	0,01
5	4	2	391,95	23,98	0,97	0,01	0,56	0,15
5	5	1	-----	-----	-----	-----	-----	-----
5	5	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Donde:

Sensor 1=Turbotag, 2=Temptale, 3=Caen, 4= Caen Sonda y 5 = Ibutton

Ensayo 1 = -20°C -10°C -20°C, 2= -2°C +18°C -2°C, 3= +6°C +24°C +6°C, 4=+10°C +26°C +10°C, 5= -20°C +26°C -20°C

Rampa 1= Bajada, 2=Subida

En general los parámetros de bondad de ajuste del modelo son bastante buenos, con un r^2 en torno a 1, la excepción a esta afirmación es el ensayo 1, que como se explicó líneas arriba, debido a la presencia de picos de temperatura detectados durante el cambio de sensores entre cámaras se tradujo en peores ajustes, siendo aún más notorio en las rampas de subida (ver Figura 21)

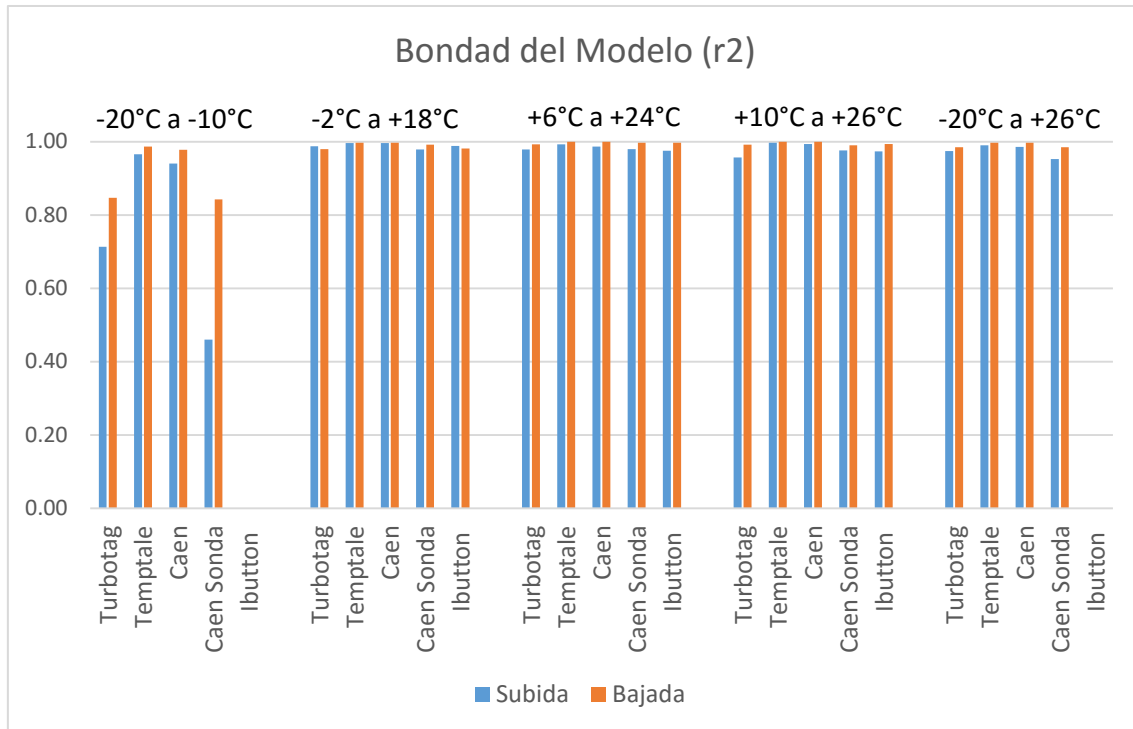


Figura 21. Bondad del Modelo r^2 por cada Ensayo y Sensor

El ANOVA cuyo resultado se presenta en la Figura 22, muestra que existe un efecto significativo ($F=28.7$, $p<0.05$) de la interacción entre los tres factores: (1) tipo de sensor, (2) tipo de ensayo y (3) rampa, sobre el valor de r^2 del ajuste del modelo. Como ya se ha dicho el ajuste obtenido para el ensayo 1 es significativamente mucho peor en los casos de los sensores 1 y 4 que son los que presentan tal y como se verá en el apartado siguiente los menores tiempos de respuesta y por tanto los más sensibles a los cambios en el sistema dinámico a supervisar.

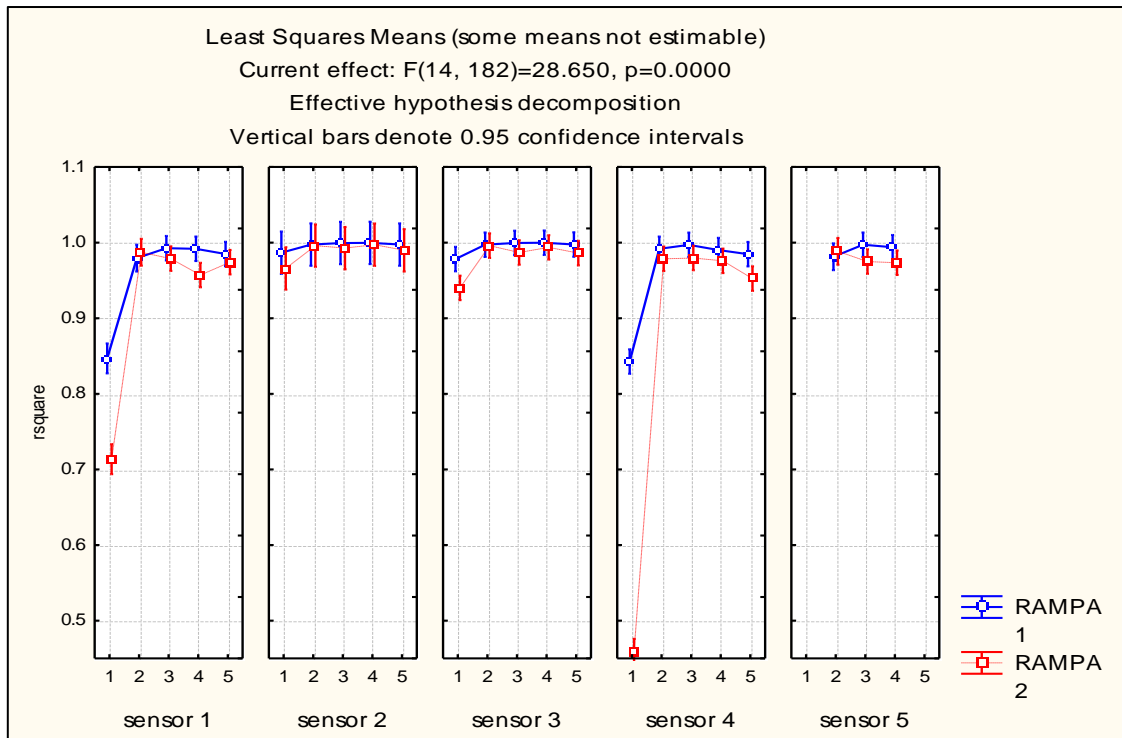


Figura 22. ANOVA que muestra el efecto del tipo de sensor, ensayo y rampa sobre el parámetro r^2 de ajuste del modelo.

Por otro lado, el ANOVA cuyo resultado se presenta en la Figura 23 muestra que existe un efecto significativo ($F=2.22, p<0.05$) de la interacción entre los tres factores: (1) tipo de sensor, (2) tipo de ensayo y (3) rampa, sobre el valor de rmse de ajuste del modelo. Se observa como son los ensayos de mayor salto térmico (ensayo 5) y los que incluyen temperaturas bajo cero (ensayo 1 y 5) los que resultan en valores de rmse más altos, alcanzándose distancias promedio de 1.4°C con respecto al modelo para aquellos sensores con menor tiempo de respuesta como el sensor 4. Del mismo modo la Figura 24 muestra como la mayor dispersión de datos en la estimación del parámetro “ a ” del modelo se corresponde con el ensayo de mayor salto térmico.

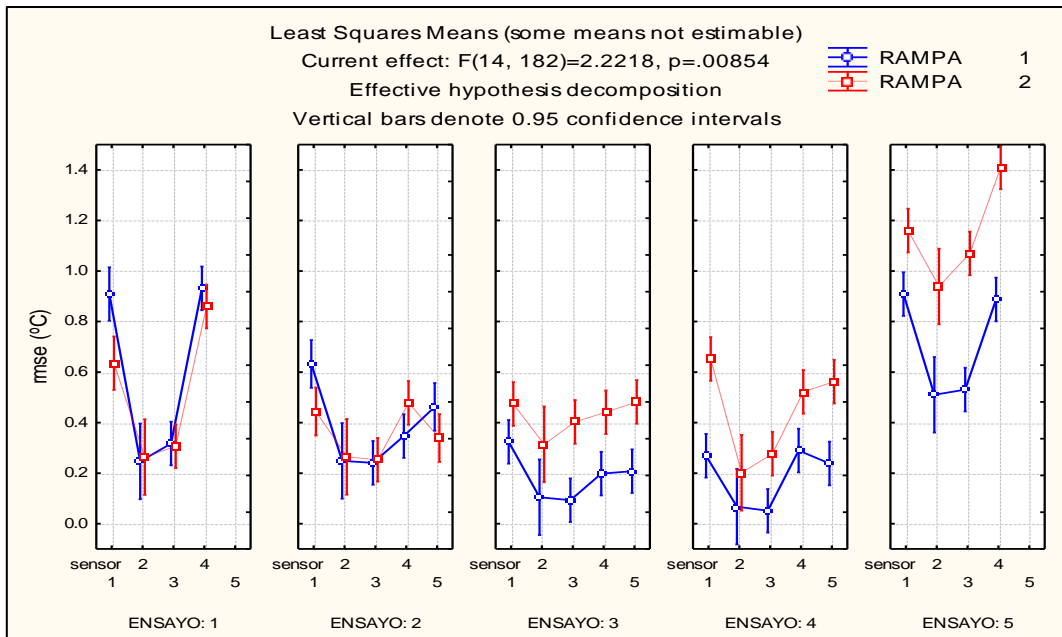


Figura 23. ANOVA que muestra el efecto del tipo de sensor y ensayo sobre el parámetro r^2 de ajuste del modelo.

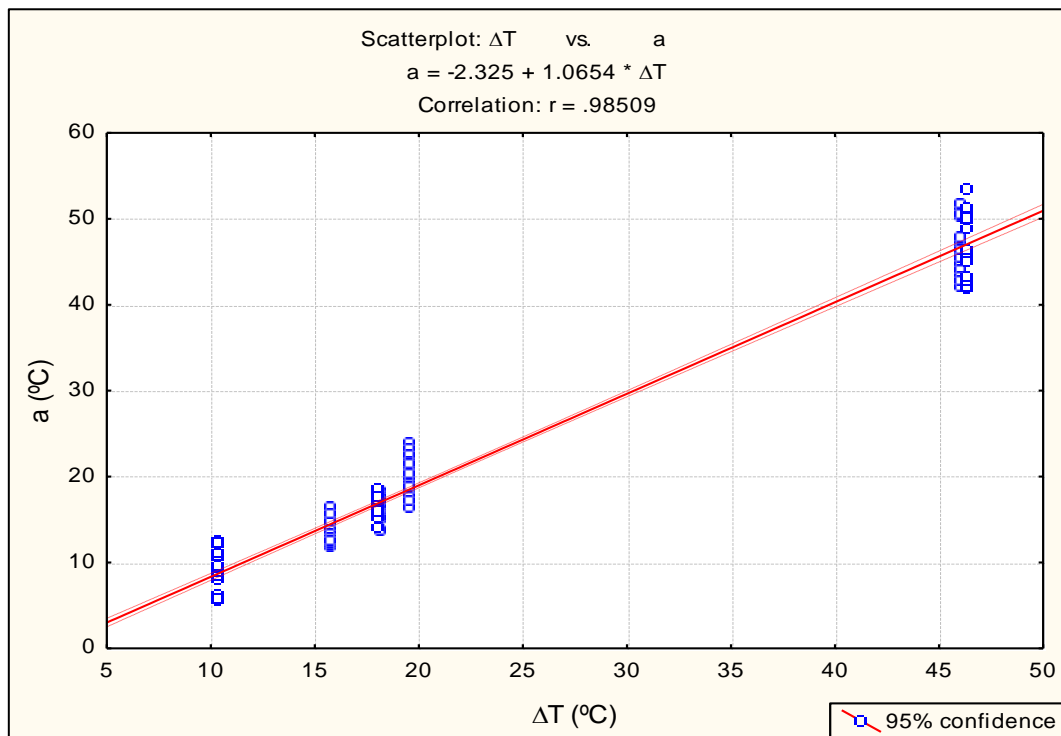


Figura 24. Gráfico de correlación entre los valores reales de ΔT para cada ensayo y el parámetro a de ajuste del modelo exponencial.

También existe un efecto importante de las temperaturas iniciales muy bajas (-20°C) sobre la respuesta dinámica del sensor ante una subida de temperaturas tal y como muestra la Figura 25 en la que se observa como la estimación del parámetro c del modelo muestra una mayor dispersión de datos para este caso.

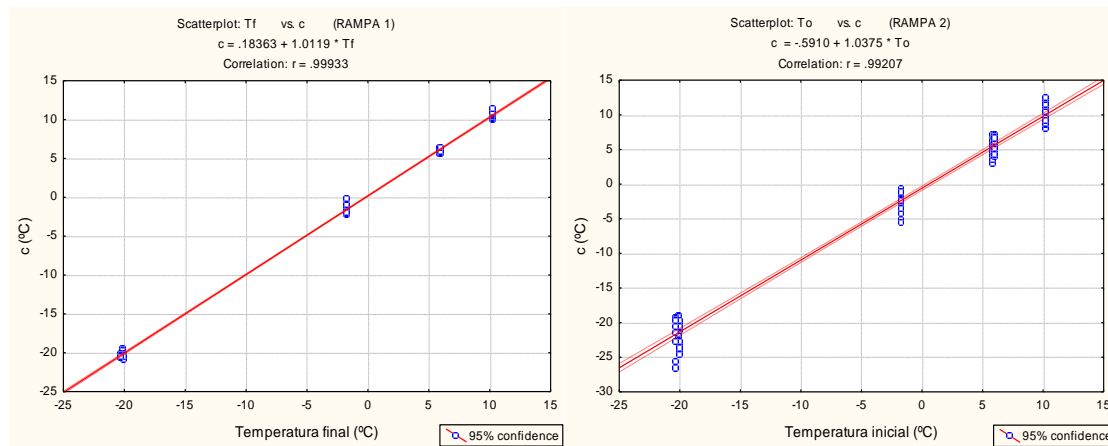


Figura 25. Gráfico de correlación entre los valores reales de T^a inicial y T^a final para cada ensayo y rampa descendente y ascendente con el parámetro c de ajuste del modelo exponencial.

Todos estos resultados indican como en los descensos de temperatura la respuesta dinámica del sensor se ajusta mejor al modelo exponencial según todos los parámetros: r^2 más altas, rmse más bajas, mejor correlación del parámetro “ c ” con los valores reales del ensayo. Por el contrario las subidas de temperatura dan peores resultados de forma que la dinámica del sensor se está viendo afectada por otros efectos tales como la histéresis o la inercia térmica de la electrónica y encapsulado del sensor. Este resultado es interesante puesto que lo más habitual es la rotura de la cadena de frío por incrementos notables de temperatura con respecto a la consigna.

7.3 Tiempo característico

A continuación se muestra el ANOVA realizado para conocer el efecto que tienen sobre el tiempo de respuesta dinámico de los sensores (parámetro “ b ”), factores tales como (1) el tipo de sensor, (2) las rampas de temperatura (subida y bajada) y (3) el número de ensayo. Cabe señalar que al no poder usar los sensores Ibutton en todos los ensayos, el ANOVA se realizó excluyendo a estos del análisis.

Como puede apreciarse en la Tabla 9, el mayor efecto sobre el tiempo de respuesta lo tiene el tipo de sensor utilizado ya que presentan diferentes tipos de encapsulados, lo que tiene un efecto altamente significativo ($F = 1530,3$) sobre el parámetro “ b ”, el segundo lugar lo ocupa el tipo de ensayo utilizado ($F = 523,9$) y finalmente, el sentido ascendente o descendente de la rampa ($F = 141,9$).

Tabla 9. ANOVA llevado a cabo para conocer el Factor que tiene mayor Efecto sobre el Tiempo de Respuesta de los Sensores.

Univariate Tests of Significance for b (DATOS SENSORES.sta)					
Sigma-restricted parameterization					
Effective hypothesis decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept		0			
ids	4540913	3	1513638	1530.323	0.000000
ENSAYO	1036468	2	518234	523.947	0.000000
RAMPA		0			
ids*ENSAYO	260835	14	18631	18.836	0.000000
ids*RAMPA	27293	3	9098	9.198	0.000011
ENSAYO*RAMPA	280784	2	140392	141.940	0.000000
ids*ENSAYO*RAMPA	48492	14	3464	3.502	0.000044
Error	180016	182	989		

Nota: ids es el identificador del tipo de sensor

Conociendo que el mayor efecto lo causa el factor tipo de sensor, se evaluará como es la respuesta dinámica comparativa entre sensores, lo cual queda explicado en la Figura 26, donde se aprecia que el sensor Turbotag y el sensor caen sonda tienen comportamientos similares y los menores tiempos de respuesta, mientras que los sensores altamente encapsulados como el sensor Caen y Temptale tienen los mayores tiempos de respuesta.

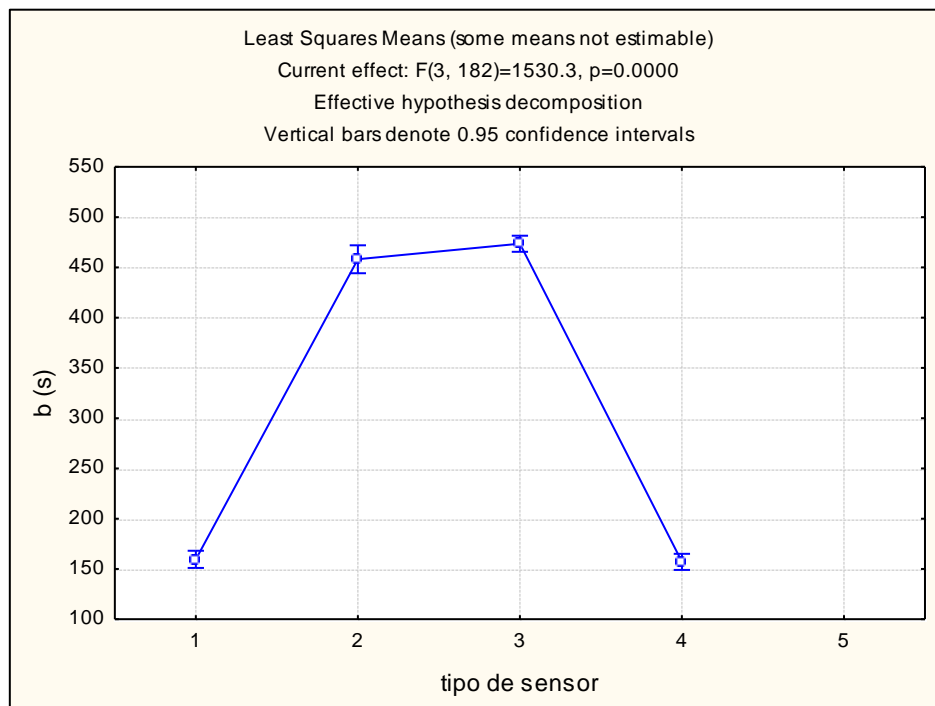


Figura 26. Comparativa del tiempo característico “b” o “τ” sobre cada sensor.

Donde:

1 = Turbotag, 2= Temptale, 3= Caen, 4= Caen Sonda y 5= Ibutton.

También se presenta la Figura 27, que explica la comparativa entre los tiempos de respuesta, los sensores y el ensayo. Nótese una vez más la similitud en el comportamiento del sensor Turbotag con el sensor Caen sonda e Ibutton. Este grupo de sensores tienen un tiempo característico promedio 3 veces menor, que los registrados por los sensores altamente encapsulados. Así mismo véase como los tiempos característicos más bajos corresponden para todos los sensores con los ensayos que incluyen temperaturas de -20°C (ensayos 1 y 5).

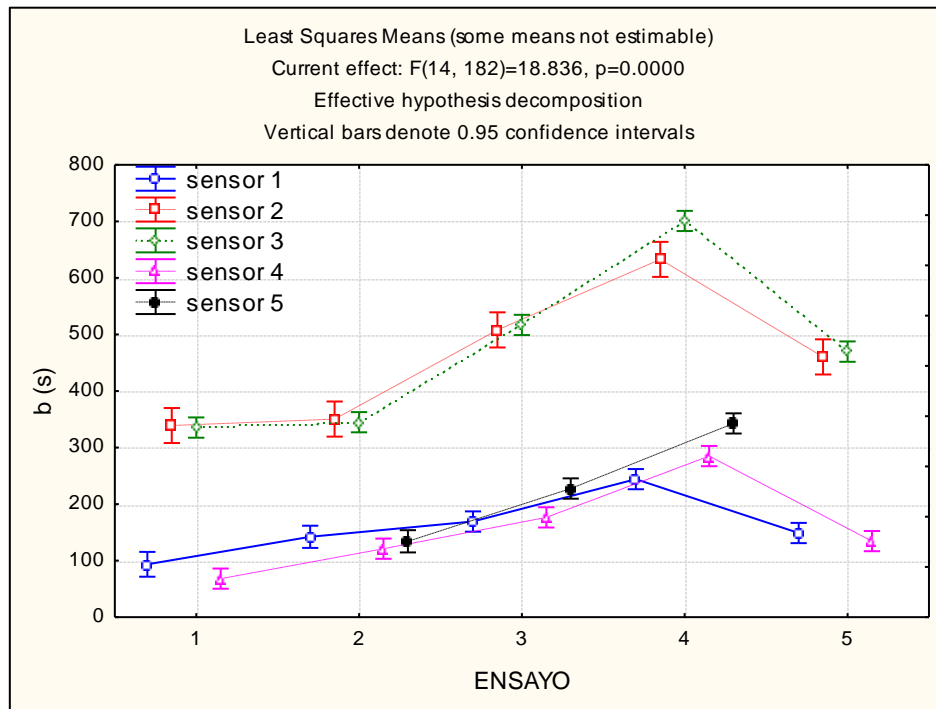


Figura 27. Comparativa del tiempo de respuesta sobre cada Sensor y Ensayo.

Donde:

Sensor 1 = Turbotag, sensor 2= Temptale, sensor 3= Caen, sensor 4= Caen Sonda y sensor 5= Ibutton.

Ensayo 1 = -20°C -10°C -20°C , 2= -2°C $+18^{\circ}\text{C}$ -2°C , 3= $+6^{\circ}\text{C}$ $+24^{\circ}\text{C}$ $+6^{\circ}\text{C}$, 4= $+10^{\circ}\text{C}$ $+26^{\circ}\text{C}$ $+10^{\circ}\text{C}$, 5= -20°C $+26^{\circ}\text{C}$ -20°C

Por otro lado en la Figura 28, observamos cómo es distinto el comportamiento de los sensores en función de si estamos en una rampa de subida o de bajada, aunque como vimos en el ANOVA este efecto tiene la menor incidencia en el tiempo de respuesta en comparación a los otros factores. La gráfica muestra como los tiempos característicos son ligeramente más bajos en las rampas de subida frente a los correspondientes a las rampas de bajada aplicadas a los sensores.

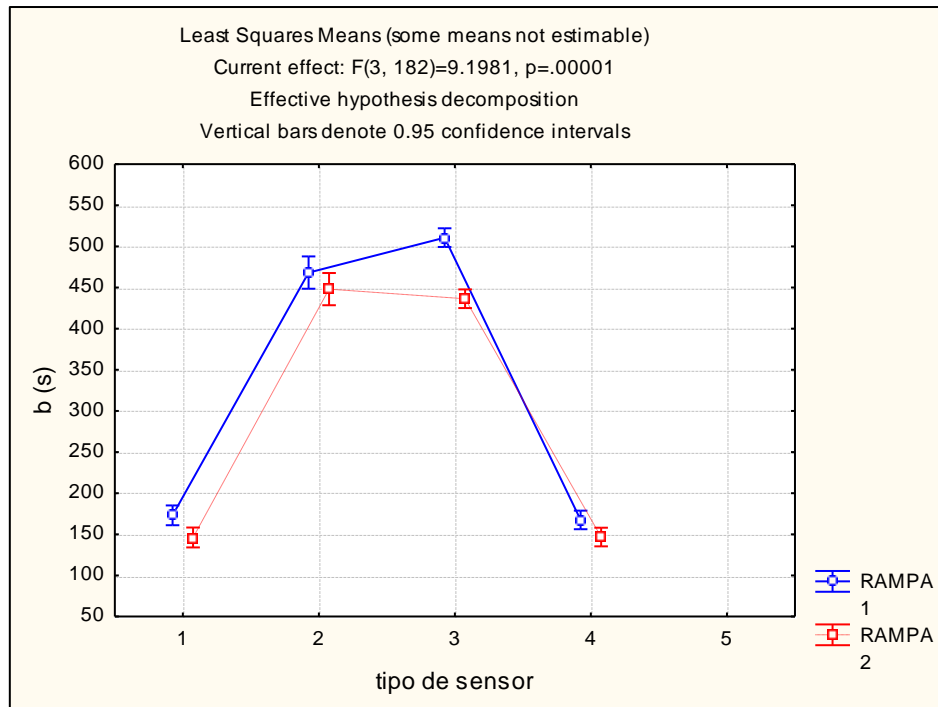


Figura 28. Comparativa del tiempo de respuesta sobre cada Sensor y Rampa.

Donde:

1 = Turbotag, 2= Temptale, 3= Caen, 4= Caen Sonda y 5= Ibutton
Rampa 1= Bajada, 2=Subida

La Figura 29 muestra tal y como se ha dicho anteriormente como el sensor 2 (Temptale) y el señor 3 (Caen) tienen los mayores tiempos característicos para todos los ensayos realizados. Es interesante destacar como en el ensayo 4 la rampa de subida presenta tiempos característicos significativamente más altos que la rampa de bajada cambiando la tendencia observada de similares o inferiores tiempos característicos de la rampa de subida frente a la rampa de bajada. Este efecto se puede deber a una fluctuación del flujo de aire generado por el equipo de frío identificado en este ensayo en particular.

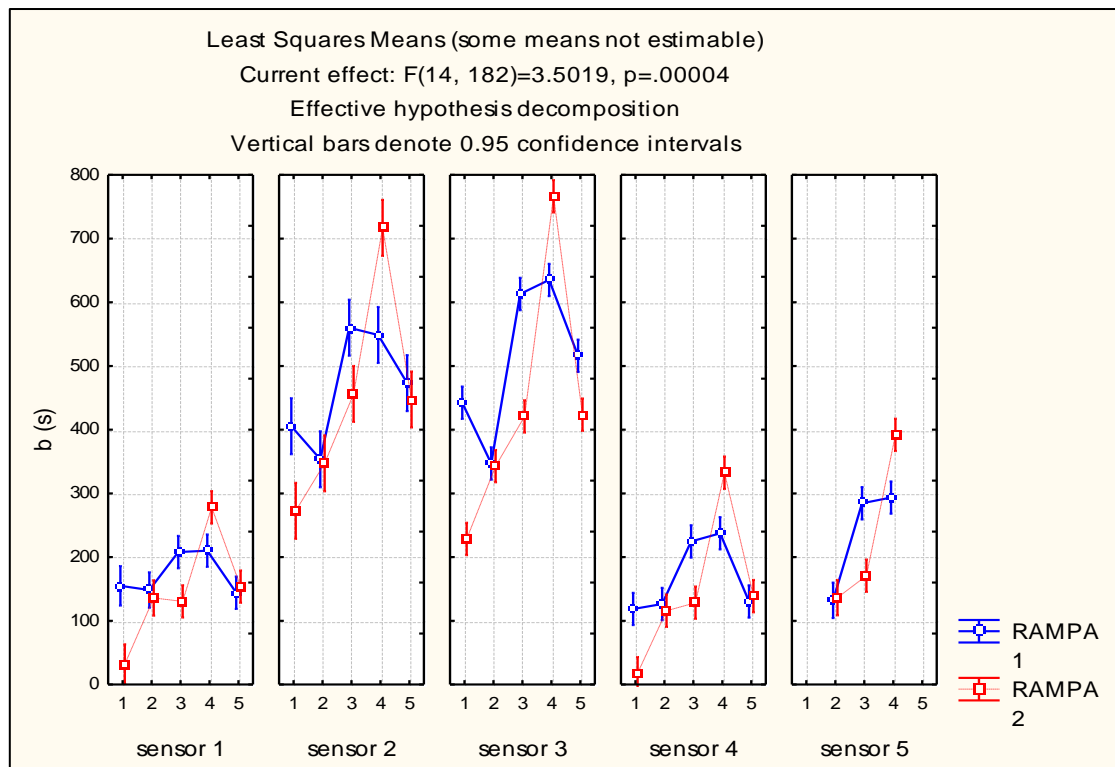


Figura 29. Comparativa del tiempo característico registrado por cada sensor y ensayo.

Donde:

Sensor 1 = Turbotag, sensor 2= Temptale, sensor 3= Caen, sensor 4= Caen Sonda y sensor 5= Ibutton.

Rampa 1= Bajada, 2=Subida

1 = Ensayo $-20^{\circ}\text{C} -10^{\circ}\text{C} -20^{\circ}\text{C}$, 2= Ensayo $-2^{\circ}\text{C} +18^{\circ}\text{C} -2^{\circ}\text{C}$, 3= Ensayo $+6^{\circ}\text{C} +24^{\circ}\text{C} +6^{\circ}\text{C}$, 4= Ensayo $+10^{\circ}\text{C} +26^{\circ}\text{C} +10^{\circ}\text{C}$, 5= Ensayo $-20^{\circ}\text{C} +26^{\circ}\text{C} -20^{\circ}\text{C}$

7.4 Tiempo de respuesta y parámetros T90 y T3

La Tabla 10 muestra los resultados obtenidos para los parámetros tiempo de respuesta, T90 y T3, los cuales fueron calculados en base a la curva de ajuste exponencial:

Tabla 10. Resultados obtenidos para los parámetros referidos al T90

ids	ENSAYO	RAMPA	Tiempo en alcanzar el T90 (s)	Desv. Estandar	% de la T° alcanzada en 3 min	Desv. Estandar	T° a los 3 minutos	Desv. Estandar	5 veces "b" (estabilidad) (s)	Desv. Estandar
1	1	1	382,19	3,88	66,24	0,79	-16,67	0,08	775,01	49,86
1	1	2	47,80	7,23	70,13	1,07	-12,90	0,11	159,96	22,72
1	2	1	353,50	52,87	66,37	6,90	4,83	1,35	741,99	113,90
1	2	2	588,37	199,02	63,84	4,43	10,72	0,86	679,80	57,28
1	3	1	482,60	57,40	59,59	4,82	13,23	0,88	1039,37	106,83
1	3	2	413,28	53,40	61,69	3,23	17,09	0,57	652,74	79,78
1	4	1	555,04	96,27	60,12	2,96	16,54	0,47	1050,39	74,84
1	4	2	738,62	214,35	41,27	2,68	16,76	0,42	1391,24	319,02
1	5	1	340,65	19,22	69,07	1,99	-5,88	0,84	720,45	37,18
1	5	2	488,56	55,04	62,23	4,53	8,57	2,10	768,52	73,28
2	1	1	1029,90	32,57	45,09	1,96	-14,48	0,20	2027,47	91,38
2	1	2	240,14	7,69	35,46	0,06	-16,49	0,01	1362,92	92,91
2	2	1	830,64	17,18	38,71	6,25	10,23	1,22	1768,05	170,11
2	2	2	1449,12	172,25	31,66	4,55	4,45	0,89	1736,26	393,48
2	3	1	1179,22	10,55	33,44	1,57	17,97	0,30	2800,51	88,37
2	3	2	1321,75	462,49	27,85	0,25	10,96	0,00	2280,77	320,48
2	4	1	1243,20	150,60	35,63	2,28	20,40	0,36	2743,62	3,58
2	4	2	2921,56	579,50	17,19	9,49	12,96	1,50	3584,39	201,23
2	5	1	1049,93	32,53	33,83	2,05	10,39	0,89	2365,72	32,73
2	5	2	1468,18	23,16	31,81	0,35	-5,48	0,27	2237,47	134,78
3	1	1	1279,20	49,46	41,40	2,28	-14,10	0,24	2211,69	114,74
3	1	2	200,42	31,67	41,86	2,52	-15,83	0,26	1142,53	134,84
3	2	1	851,10	89,81	39,44	6,14	10,08	1,20	1734,87	266,68
3	2	2	1361,80	263,10	33,45	4,23	4,80	0,83	1713,90	346,71
3	3	1	1315,51	15,22	32,72	2,80	18,10	0,52	3065,19	73,46
3	3	2	964,71	345,01	31,35	1,42	11,59	0,23	2104,26	389,35
3	4	1	1477,00	164,52	34,44	3,85	20,59	0,61	3175,40	46,82
3	4	2	2457,13	354,84	18,71	6,79	13,20	1,07	3832,07	487,70
3	5	1	1156,32	20,00	31,10	0,73	11,65	0,33	2579,83	36,55
3	5	2	1548,10	61,47	32,17	1,09	-5,31	0,50	2117,76	57,04
4	1	1	260,59	8,24	77,14	1,51	-17,79	0,16	593,05	22,09
4	1	2	24,33	6,33	66,67	0,78	-13,26	0,08	88,99	18,46
4	2	1	289,18	36,54	74,52	4,29	3,25	0,84	632,10	76,52
4	2	2	388,79	83,92	70,83	4,47	12,08	0,87	579,04	84,08
4	3	1	479,90	14,47	59,69	1,31	13,22	0,21	1122,81	25,63
4	3	2	499,55	68,97	64,55	2,76	17,61	0,49	642,50	53,10
4	4	1	558,95	56,27	59,57	1,49	16,63	0,24	1187,16	28,18
4	4	2	1803,07	516,59	39,03	1,69	16,41	0,27	1662,73	63,38
4	5	1	303,20	29,93	72,87	3,92	-7,64	1,80	651,79	57,56
4	5	2	445,13	17,71	67,66	1,77	11,07	0,84	693,84	56,25
5	1	1	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
5	1	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
5	2	1	507,38	49,95	66,66	3,15	4,78	0,61	660,53	70,95
5	2	2	483,65	169,09	69,72	2,57	11,87	0,50	681,75	28,91
5	3	1	686,81	58,57	49,27	4,28	15,10	0,78	1422,28	54,24
5	3	2	728,63	95,11	59,77	2,25	16,74	0,39	853,76	61,03
5	4	1	847,76	162,01	51,02	2,22	17,98	0,35	1467,24	24,76
5	4	2	1316,64	109,84	38,44	4,19	16,31	0,66	1959,77	119,90
5	5	1	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
5	5	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Donde:

Sensor 1=Turbotag, 2=Temptale, 3=Caen, 4= Caen Sonda y 5 = Ibutton

Ensayo 1 = -20°C -10°C -20°C, 2= -2°C +18°C -2°C, 3= +6°C +24°C +6°C, 4=+10°C +26°C +10°C, 5= -20°C +26°C -20°C

Rampa 1= Bajada, 2=Subida

La Figura 30, muestra como en todos los ensayos, son los sensores 1, 4 y 5 los que muestran tiempos t_{90} más próximos a 180 s (3 min) son por tanto los que más se acercan a las recomendaciones que hace AECOC. Esto sin duda, está muy relacionado con el nivel de encapsulado del sensor, pues son precisamente los sensores Turbotag, Caen Sonda e Ibutton, los que presenten menor recubrimiento, luego menor resistencia a la transferencia de calor por conducción a través de los materiales de encapsulado y menor masa por lo tanto menor inercia térmica. La alta variabilidad en el ensayo 4 se debe a la inestabilidad del flujo de aire detectado en una de las repeticiones, la cual afectó principalmente la rampa de subida de la primera repetición y en menor medida a la rampa de bajada. Aquí también podemos apreciar como la variabilidad tiende a ser más notoria en las rampas de subida, este comportamiento es atribuible a la dificultad que presenta al sensor en alcanzar una temperatura alta, habiendo estado previamente a una temperatura baja (recuérdese que en la repetición 1 el tiempo previo fue de 30 minutos y en la repetición 2 de 60 minutos), no observándose este comportamiento en el caso contrario, donde los sensores responden a los descensos de temperatura con mayor facilidad. Esto también explica que esta variabilidad no se observe en el Ensayo 5 donde los tiempos fueron de 60 minutos en cada cámara.

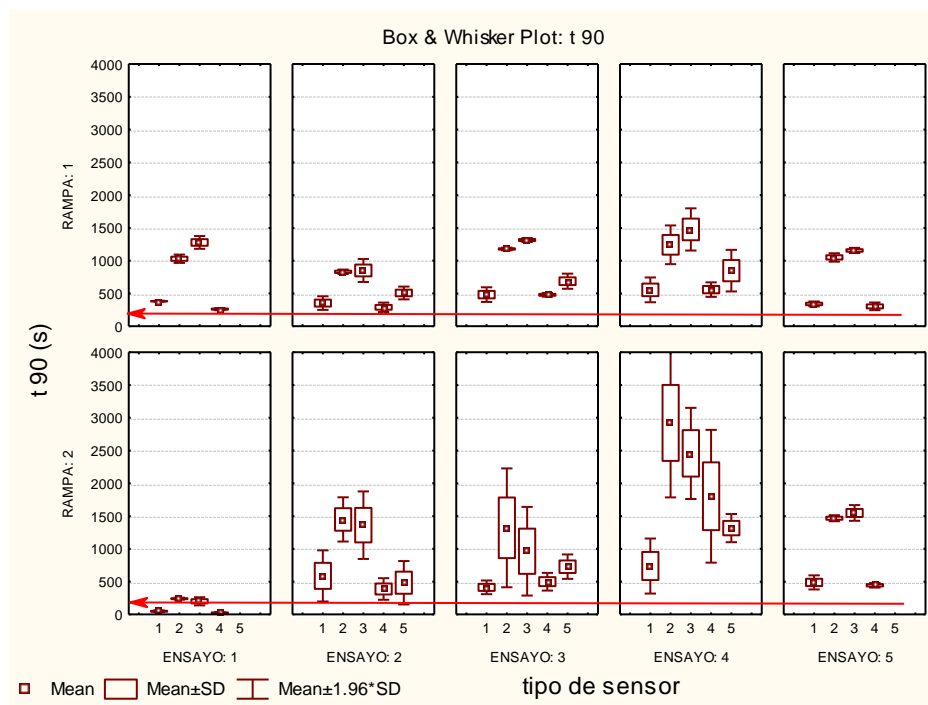


Figura 30. Box & whisker plot que presenta los valores promedios del t_{90} para cada sensor, ensayo y rampa. La flecha indica el tiempo de 3 min (180s).

Donde:

1=Turbotag, 2=Temptale, 3=Caen, 4= Caen Sonda y 5 = Ibutton

Ensayo 1 = $-20^{\circ}\text{C} -10^{\circ}\text{C} -20^{\circ}\text{C}$, 2= $-2^{\circ}\text{C} +18^{\circ}\text{C} -2^{\circ}\text{C}$, 3= $+6^{\circ}\text{C} +24^{\circ}\text{C} +6^{\circ}\text{C}$, 4= $+10^{\circ}\text{C} +26^{\circ}\text{C} +10^{\circ}\text{C}$, 5= $-20^{\circ}\text{C} +26^{\circ}\text{C} -20^{\circ}\text{C}$

Rampa 1= Bajada, 2=Subida

La Figura 31, indica qué salto térmico es capaz de registrar el sensor en % a los 3 minutos. De forma general en las rampas de subida los sensores 1, 4 y 5 son capaces de registrar cambios de temperatura que igualan o superan al 63,2% que define al tiempo característico de cada sensor. Esto significa que son capaces de registrar subidas de temperatura promedios de 6°C, lo cual sería suficiente para captar por ejemplo las subidas de temperatura de + de 3°C que se admiten en las operaciones de transporte.

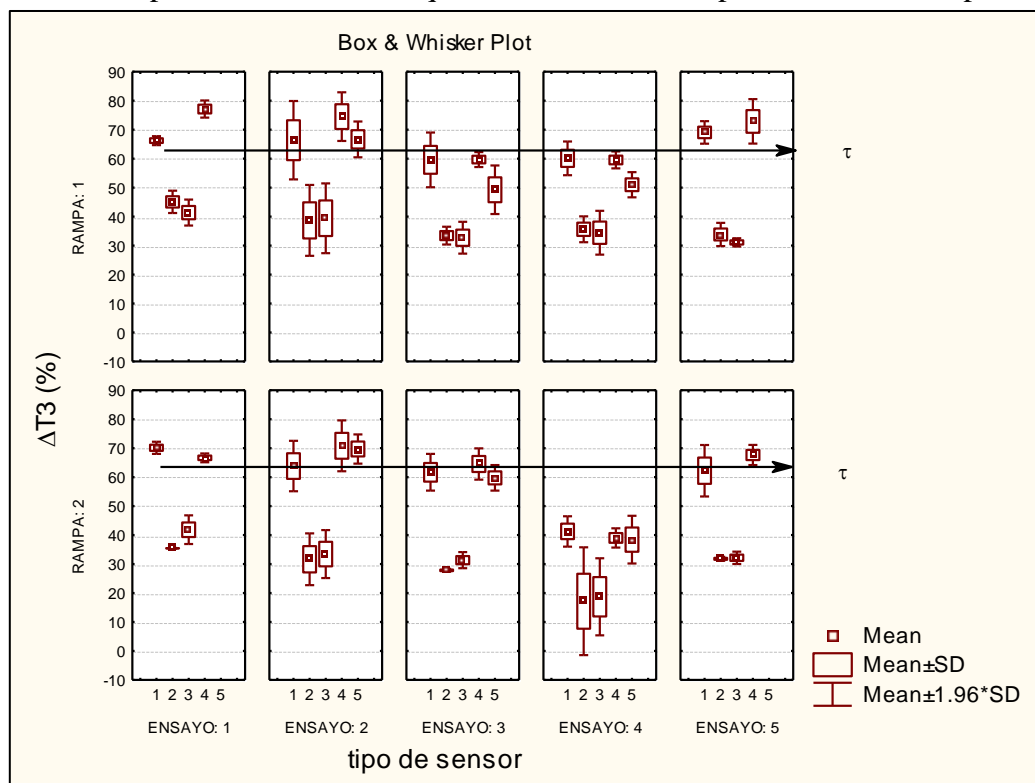


Figura 31. Box & whisker plot que presenta los valores promedios de ΔT_3 para cada sensor, ensayo y rampa. La flecha indica el salto térmico para t (63,2%).

La Figura 32, nos muestra uno de los errores cometidos en el diseño de experimentos. Puesto que los tiempos de respuesta no están indicados en las hojas técnicas de los sensores o no exactamente para los saltos térmicos ensayados, se consideró que en una aproximación inicial un tiempo de 30 minutos sería suficiente para alcanzar la estabilidad en cada uno de los sensores. Como se puede observar en algunos de los gráficos iniciales muchos de los sensores no alcanzan la temperatura final de consigna, esto queda explicado en la Figura 15 que nos muestra como especialmente los sensores 2 y 3, no alcanzan la temperatura final porque hubieran necesitado un tiempo mayor hasta la estabilización más elevada, de hasta 58 minutos de media (prácticamente el doble de lo utilizado en este trabajo) en el caso del experimento 4. Con esta gráfica también es fácil ver porque los sensores en algunos ensayos, nos dan algunos errores al momento de calcular el tiempo necesario para alcanzar el 90% del cambio de temperatura, y es porque al no llegar a la temperatura consigna de la cámara, el modelo de ajuste exponencial utilizado no logra calcular este valor con precisión.

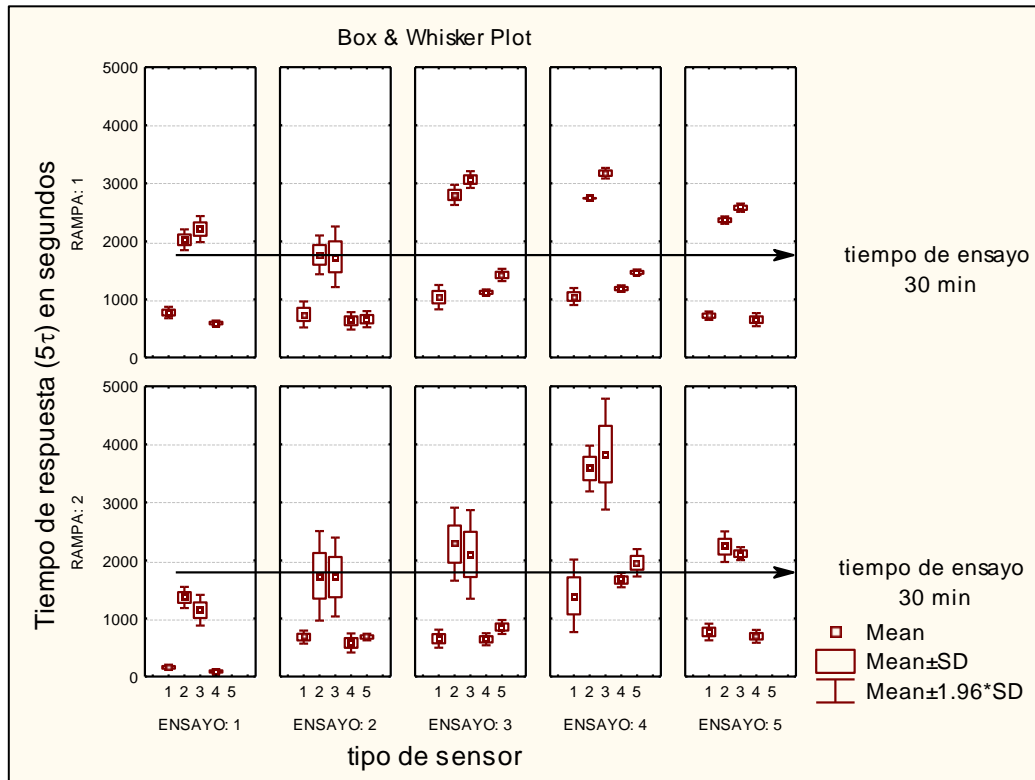


Figura 32. Box & whisker plot que presenta los valores promedios del tiempo de respuesta para cada sensor, ensayo y rampa. La flecha indica la duración de los ensayos (30 min).

7.5 Discusión

Tal como lo indicaron Badia-Melis et al. (2014), en el presente TFM, se ha podido corroborar el efecto altamente significativo que tiene el encapsulado sobre los tiempos de respuesta de los sensores, aumentando en función de cuan protegido este el sensor. Al tener un efecto significativamente alto ($F = 523,9$) el tipo de ensayo realizado, es difícil realizar una comparación con los tiempos de respuesta característicos encontrados por ellos, prueba de ello es ver como para el salto térmico más parecido (Ensayo 3: $+6^{\circ}\text{C}$ a $+24^{\circ}\text{C}$), los resultados obtenidos difieren mucho. Mientras que Badia-Melis et al. (2014) indican un tiempo característico de 104,6 segundos y 122,2 segundos para rampa de subida y bajada respectivamente, nosotros encontramos un tiempo característico de 130,5 y 207,8 segundos (subida y bajada respectivamente) para el mismo sensor.

En cuanto a los tiempos de respuesta indicados por las fichas técnicas para los sensores Caen e Ibutton (ver Tabla 4), podemos ver como para un ensayo similar, en el caso de los Ibutton, el fabricante indica un tiempo de respuesta de 300 segundos (5 minutos) hasta alcanzar el 90% del salto térmico, mientras que nosotros hemos obtenido un tiempo de 483,65 segundos (8 minutos), mientras que para el caso del sensor Caen, el

tiempo de respuesta indica por el fabricante es de 1200 segundos (20 minutos), y nuestros datos un valor de 1361,80 segundos (22,5 minutos). La comparación de estos valores se ha realizado con lo encontrado por nosotros en el Ensayo 2 (-2°C a +18°C), pero una vez más resulta difícil hacer una comparación al no usar las mismas temperaturas consigna.

En términos generales, los sensores que mostraron mayor aptitud para ser aplicados a la cadena de frío fueron los sensores Turbotag, Caen Sonda y los Ibutton, pues presentaron tiempos de respuesta y tiempos característicos menores a los Temptale y Caen. En particular para los tipos de alimentos 1 hasta el 5, los sensores con menores tiempos de respuesta serían los más recomendables. Aunque es conveniente mencionar que si los procesos a supervisar no tendrán variaciones térmicas muy altas, inclusive los sensores Temptale y Caen serían recomendables puesto que en 3 minutos son capaces de detectar entre 5 y 8 °C de diferencia térmica, dependiendo de las temperaturas consigna a utilizar.

En el caso de los alimentos congelados y ultracongelados, que representan el ensayo 5, es probable que de tener saltos térmicos muy grandes, no logre a registrarse la totalidad de la variación térmica, esta afirmación se hace en base a los resultados obtenidos en el presente trabajo que muestran que todos los sensores, inclusive los menos encapsulados no llegaron a registrar la temperatura consigna cuando se trabajó en temperaturas negativas (-20°C a -10°C).

8 CONCLUSIONES

Son muchos los factores que influyen en el comportamiento dinámico de los sensores, en este trabajo, analizando de forma concreta 3 de ellos, como el tipo de sensor, tipo de ensayo (saltos térmicos distintos) y tipo de rampa (ascendente y descendente), podemos concluir que los 3 elementos, influyen de forma directa, aunque en diferente grado, en los tiempos de respuesta de los sensores.

El tiempo de respuesta dinámico de los sensores de temperatura utilizados en el presente TFM, demostraron estar altamente influenciados el tipo de sensor, dando la significancia más alta ($F = 1530,3$). Si el sensor está fuertemente encapsulado (caso del Temptale) o sin encapsulado (caso del Caen Sonda), los tiempos de respuesta son distintos siendo menores en aquellos sensores sin o mínimamente encapsulados.

Por otro lado, en base a este trabajo, podemos concluir que los sensores más idóneos para controlar y supervisión la cadena frío serían aquellos que presenten un encapsulado mínimo, en especial en aquellos casos donde se prevé que se encontrarán rupturas en la cadena de frío con saltos térmicos grandes, aunque haciendo la salvedad de que si se conoce que las variaciones térmicas no son muy grandes, los sensores con cierto encapsulado como los sensores Temptale y Caen también serían recomendables.

9 BIBLIOGRAFÍA

- AECOC. (1997). *Recomendaciones AECOC para la logística (RAL) - Distribución de productos congelados*. España:
- AECOC. (2003). *Recomendaciones AECOC para la logística (RAL) - Distribución de productos refrigerados*. España:
- Arduino, G., Carrillo Murillo, D., & Parola, F. (2015). Refrigerated container versus bulk: Evidence from the banana cold chain. *Maritime Policy & Management*, 42(3), 228-245.
- Arias Carrillo, J. M., Domínguez Alonso, M., & García Rodríguez, C. (2009). Recomendaciones para la conservación y transporte de alimentos perecederos. *Instituto Del Frío Artículos, Digital CSIC*.
- Arias Guadarrama, P. (2005). *Clasificación de redes de telecomunicaciones alámbricas e inalámbricas* (Trabajo Fin de Grado). Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Pachuca-Mexico
- Armstrong, W., Quintana, L., & Chesta, V. (2012). Evaluación de la cadena de frío en cinco fábricas de cecinas y su implicancia en el recuento microbiológico. *Revista Chilena De Nutrición*, 39(1), 53-61.
- Badia-Melis, R., Garcia-Hierro, J., Ruiz-Garcia, L., Jimenez-Ariza, T., Villalba, J. I. R., & Barreiro, P. (2014). Assessing the dynamic behavior of WSN motes and RFID semi-passive tags for temperature monitoring. *Computers and Electronics in Agriculture*, 103, 11-16. doi:10.1016/j.compag.2014.01.014
- Brecht, J. K., Émond, J. P., Nunes, M. C., Sims, C. A., Obadasi, A., & Uysal, I. (2011). *Remote environmental monitoring And Diagnostics in the perishables supply Chain Phase I*. Technical Report. US Army Natick.
- Correa Hernando, E. C., & Barreiro Elorza, P. (2015). Poscosecha de precisión en los albores del siglo XXI (parte I). *Horticultura*, 316, 62-67.
- Correa, E. C., Jimenez-Ariza, T., Diaz-Barcos, V., Barreiro, P., Diezma, B., Oteros, R., . . . Ruiz-Altisent, M. (2014). Advanced characterisation of a coffee fermenting tank by multi-distributed wireless sensors: Spatial interpolation and phase space graphs. *Food and Bioprocess Technology*, 7(11), 3166-3174. doi:10.1007/s11947-014-1328-4
- Domínguez Alonso, M., García Rodríguez, C., & Arias Carrillo, J. M. (2008). Aplicaciones del frío. *Instituto del Frío Artículos. Digital CSIC*.
- FAO. (2009). *La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050*. Foro de Expertos de Alto Nivel Cómo alimentar al Mundo en 2050, Roma:

- FAO. (2014). *Pérdidas y desperdicios de alimentos en américa latina y el caribe*
- Fraile Mora, J., Garcia Gutiérrez, P., & Fraile Ardanuy, J. (2012). *Instrumentación aplicada a la ingeniería* (3a ed.). Madrid-España: Garceta.
- Gustavsson, J., Cederberg, C., Sonesson, U., van Otterdijk, R., & Meybeck, A. (2012). *FAO. Pérdidas y desperdicio de alimentos en el mundo – alcance, causas y prevención*. In “SAVE FOOD! Interpack 2011”, Düsseldorf-Alemania:
- Jimenez-Ariza, H. T., Correa, E. C., Diezma, B., Moya-Gonzalez, A., Arranz, F. J., & Barreiro, P. (2015). Multi-distributed wireless sensors for monitoring a long distance transport in a reefer container. *International Journal of Postharvest Technology and Innovation*, 5(2), 149-166. doi:10.1504/IJPTI.2015.074327
- Jimenez-Ariza, T., Correa, E. C., Diezma, B., Silveira, A. C., Zocalo, P., Arranz, F. J., . . . Ruiz-Altisent, M. (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(6), 1793-1806. doi:10.1007/s11947-013-1191-8
- Montaya Londoño, J. Monitoreo y visualización de temperaturas en el área de generación de frío de la planta de derivados lácteos colanta san pedro de los milagros. 2009, *Universidad Nacional De Colombia*.
- Pallás Areny, R. (2003). *Sensores y acondicionadores de señal* (4a ed.). Barcelona - España: MARCOMBO, S.A.
- Pallás Areny, R., & Polo, J. (2008). *Redes de sensores aplicadas al control de procesos agroalimentarios*. II Congreso Iberoamericano sobre Seguridad Alimentaria V Congreso Español de Ingeniería de Alimentos. Barcelona - España
- Rodrigue, J., Comtois, C., & Slack, B. (2013). *The geography of transport systems* (3era ed.). Nueva York - EE.UU.: Routledge.
- Ruiz-Garcia, L., Lunadei, L., Barreiro, P., & Ignacio Robla, J. (2009). A review of wireless sensor technologies and applications in agriculture and food industry: State of the art and current trends. *Sensors*, 9(6), 4728-4750. doi:10.3390/s90604728
- Salin, V., & Nayga Jr, R. M. (2003). A cold chain network for food exports to developing countries. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 33(10), 918-933.
- Wei, B. (2011). *The cold chain management in a supermarket: Case study on the fresh food logistics in a supermarket* (Master's Thesis). University of Gävle. Sweden