

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CÁMARA CLIMÁTICA CONTROLADA PARA REPRODUCIR EPISODIOS DE TRANSPORTE DE MERCANCÍAS PERECEDERAS

Segado Fernández, María Aránzazu; Ibarrola-Lacalle, Julio José; Giménez-Gallego, Jaime; Torres-Sánchez, Roque

Departamento de Automática, Ing. Eléctrica y Tecnología Electrónica, Universidad Politécnica de Cartagena, Campus de la Muralla s/n 30202 Cartagena.

arantxasegado@gmail.com; juliojose.ibarrola@upct.es; jaime.gimenez@upct.es; roque.torres@upct.es

Resumen

La necesidad de analizar la pérdida de calidad en los alimentos se ha ido incrementando en los últimos tiempos de manera progresiva, debido a las cada vez más restrictivas condiciones de trazabilidad en las diferentes fases de distribución de los productos perecederos. Disponer de herramientas que permitan estimar las pérdidas de calidad en estas fases logísticas, ayudaría a reducir el desperdicio de alimentos desechados muchas veces por inadecuadas condiciones de conservación.

El objetivo del proyecto, donde se encuadra este trabajo, consiste en la obtención de indicadores de pérdidas de calidad de productos cuando están sometidos a variaciones térmicas no deseadas. Estos indicadores, proporcionarían valores cualitativos de la calidad de la mercancía estimando variaciones de la vida comercial del producto o "shelf life". Como parte de este proyecto, en este trabajo se ha diseñado y construido una cámara climática portátil en la que se pueden reproducir ciclos térmicos controlados durante la vida útil del producto y, de ese modo, evaluar distintos parámetros de calidad y relacionarlos con las condiciones de conservación.

Debido al alto número de ensayos que es necesario realizar para obtener indicadores fiables, este trabajo propone el diseño de una cámara de bajo coste fácilmente reproducible y escalable donde sea factible someter al producto perecedero a alteraciones térmicas controladas durante la vida comercial del producto, y obtener un shelf-life dinámico en función de las variaciones de las condiciones climáticas. Este trabajo aborda el diseño, dimensionamiento, la instrumentación y los diferentes elementos que componen el sistema de control, además de la identificación y el ajuste del regulador. Los resultados y conclusiones permiten validar el diseño planteado

quedando, la cámara desarrollada, como una herramienta útil para obtener indicadores de pérdidas de calidad ante diferentes condiciones climáticas.

Palabras clave: pérdidas de calidad de alimentos, shelf-life, alimentos perecederos, cámara climática, simulación, identificación de procesos.

1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto surgió de la necesidad de analizar y calcular las pérdidas de calidad en los alimentos perecederos durante su fase de distribución. La principal causa del deterioro de los productos perecederos hortofrutícolas durante su distribución es el inadecuado manejo de la temperatura durante la cadena de suministro. Influyen, en menor medida, una excesiva deshidratación; inadecuados niveles de O₂, CO₂, C₂H₄ y otros volátiles (etanol, acetaldehído, etc.) [1-3].

Muchas de estas causas ocurren durante las etapas del transporte y almacenamiento, que son en las que más esfuerzos tecnológicos se están realizando para ajustar las condiciones de conservación a la duración del producto. Por un lado, evitando las perturbaciones que sufren las variables durante estos procesos puesto que, si las condiciones ambientales están fuera de especificación durante estas etapas, el producto se deteriora [4]. Y por otro, ajustando el valor de la vida comercial del producto (shelf-life) a estas condiciones, de forma que se pueda destinar el producto a mercados con más rotación o con consumos más frecuentes [5,6].

La estimación dinámica del shelf-life, puede realizarse obteniendo indicadores de pérdidas de calidad a partir de los datos de conservación (principalmente temperatura), registrados durante la serie temporal de

la distribución del producto. De ese modo y, partiendo del shelf-life teórico de un producto a temperaturas ideales, las pérdidas de calidad se expresan como una estimación de reducción de ese shelf-life o, dicho de otro modo, como una reducción de la vida comercial útil.

Para lograr estas estimaciones, se recurre a entrenar modelos supervisados con las valoraciones cuantitativas de la calidad de los productos, en función de una serie de análisis físico-químicos [7,8], extrayendo muestras de producto en distintos días previos al shelf-life teórico y clasificando el producto en función de una valoración de la calidad umbral [9]. Estos ensayos requieren cámaras climáticas dedicadas y múltiples extracciones de muestras para analizar, además de la repetición de los experimentos con diferentes variaciones de conservación.

En trabajos previos [10], se han realizado ensayos de calidad en las cámaras del Instituto de Biotecnología Vegetal (IBV) de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT). Sin embargo, la disponibilidad limitada de cámaras y la dificultad de alterar las condiciones de conservación para realizar los experimentos han motivado el desarrollo de este trabajo, consistente en el desarrollo de cámaras climáticas portátiles de coste reducido, donde es posible alterar las condiciones de temperatura dadas mediante un sistema de control.

La cámara climática está fabricada a partir de un conducto rectangular realizado con láminas de lana de vidrio CLIMAVER NETO de la marca ISOVER [11], que se encarga de aislar los productos y mantener así su temperatura independiente de perturbaciones externas no provocadas. Las condiciones térmicas dentro de la cámara se obtienen mediante la impulsión de aire, cuya temperatura y caudal puede ser modificado mediante acciones de control. Para mantener unas condiciones térmicas homogéneas en el interior, se ubicaron medios porosos para generar un flujo pistón uniforme.

Para simplificar y abaratar el coste de la cámara, el diseño está pensado para que la cámara se ubique en el interior de una de las habitaciones refrigeradas del IBV. De este modo, sin acciones de control de calentamiento, el aire de la cámara portátil estaría a las mismas condiciones refrigeradas de la habitación.

El sistema se ha diseñado para que sea capaz de reproducir un ciclo temperatura-tiempo. De este modo, es posible programar una determinada evolución térmica durante un número de días concreto para poder extraer las muestras de producto y proceder a su análisis cualitativo. Estos ensayos permiten establecer correlaciones entre las variaciones observadas dentro de la cámara climática y el decremento de la vida comercial útil del producto o shelf-life.

El trabajo describe el dimensionamiento y diseño de la cámara, la identificación del modelo representado por la función de transferencia, las acciones de control y los sensores, así como el ajuste de los distintos parámetros del controlador ensayados para obtener unas determinadas especificaciones dinámicas y permanentes que validen la utilidad de la cámara climática.

2. METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Para alcanzar los objetivos del proyecto, se realizaron las siguientes tareas:

- **Modelado inicial de la cámara climática con SOLIDWORKS**

Con el objetivo de modelar la cámara, se probaron varios diseños. Como primera hipótesis, se pensó en que la cámara climática constara de dos capas: una interna, en la que se practicarían agujeros y otra externa, separada a cierta distancia de la interna, que actuaría como aislante. Finalmente, se rechazó este diseño, debido a que iba a ser difícil de implementar y no nos iba a garantizar que los resultados fuesen los requeridos por el problema.

El diseño final de la cámara consiste en un conducto rectangular de $1 \times 0.5 \times 0.5 \text{ m}^3$ que está formado por una sola capa de material, encargada de aislar su interior (Figura 1).

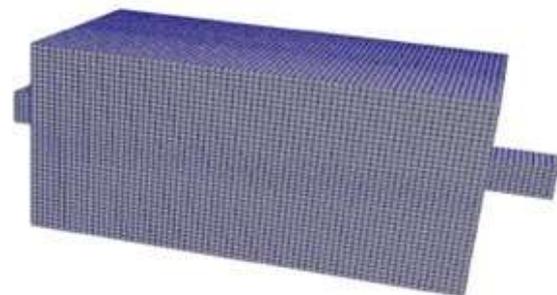


Figura 1: Diseño y simulación de cámara climática.

- **Estudio de la mecánica de fluidos del prototipo mediante una simulación con ANSYS**

Una simulación ayuda a conocer el comportamiento de un prototipo y verificar si es el adecuado. Para ello, se empleó el software de simulación de ingeniería ANSYS, desarrollado para trabajar con volúmenes finitos en el caso de la mecánica de fluidos.

Partiendo de los condicionantes de diseño expuestos, la hipótesis consiste en que, utilizando únicamente un ventilador y una resistencia calefactora, se consiga modificar la variable de la temperatura en unas condiciones controladas. Por ello, el flujo en el interior de la cámara debe de ser uniforme en toda la geometría

y no deben existir recirculaciones que produzcan un cambio en el comportamiento del aire. Para este fin, se ha implementado un análisis de las condiciones térmicas y fluidodinámicas de la cámara a estudiar mediante simulación numérica.

En el interior del conducto rectangular se colocaron dos medios porosos: uno situado a 20 cm de distancia al inicio del conducto (color marrón oscuro en Figura 2) y otro a 10 cm de distancia al final del conducto (color claro en la Figura 2). En dicha zona de trabajo se analizó el campo de presiones (Figura 2) y de temperaturas (Figura 3), donde se pudo observar que presentaban un comportamiento suficientemente homogéneo.

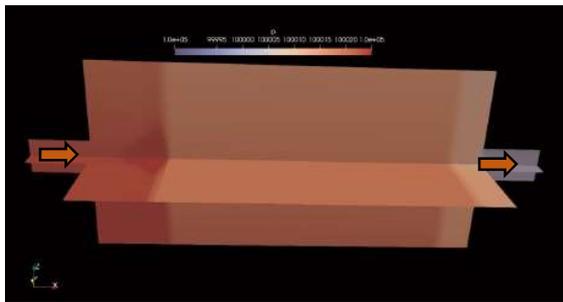


Figura 2: Evolución del campo de presiones en el interior del dominio.

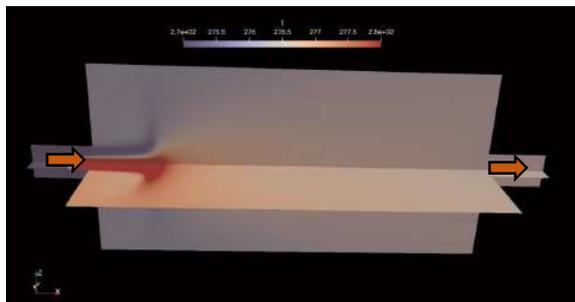


Figura 3: Evolución del campo de temperaturas en el interior del dominio.

Utilizando las simulaciones se establecieron los caudales idóneos ($100 \text{ m}^3/\text{h}$ y $30 \text{ m}^3/\text{h}$) para mantener una temperatura suficientemente constante, en la zona de trabajo (desde 0,2 m hasta 0,9 m de longitud), que se puede observar resaltada en la Figura 4. Además, se aprecia que la evolución de la temperatura posee un mejor comportamiento con un caudal de $100 \text{ m}^3/\text{h}$, por lo que se decidió trabajar con este valor.

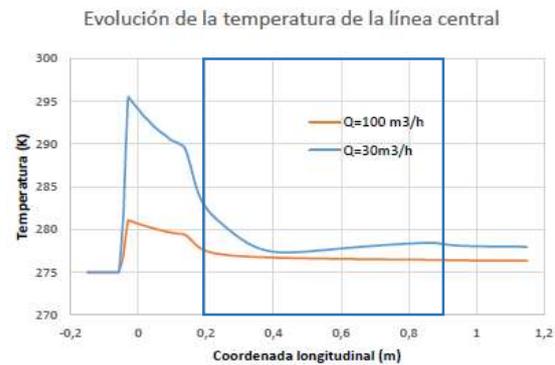


Figura 4: Evolución de la temperatura en el interior de la zona de trabajo.

- **Elaboración del diseño geométrico real de la cámara**

Las paredes de la cámara climática han sido construidas a partir del plegado de un panel rígido de Lana de Vidrio CLIMAVER NETO [11]. En su interior, se encuentran dos medios porosos, que consiguen homogeneizar el flujo (denominado *pistón*). La realimentación térmica se realiza mediante diez sensores de temperatura y humedad relativa distribuidos por todo el interior de la cámara, que se encuentran sujetos mediante unos soportes diseñados a tal efecto (Figura 5). A ello se le añade un ventilador y una resistencia, sujetos por un acople y a su vez por una brida diseñadas mediante fabricación aditiva.



Figura 5: Vista interior de la cámara de simulación.

- **Incorporación de sensores y actuadores**

Para la medición de temperatura, se emplean diez sensores modelo WES con protocolo de comunicación SDI-12, diseñados y fabricados íntegramente en la UPCT. Los diez sensores empleados en este trabajo se distribuyen por todo el interior de la cámara: uno a la entrada, otro a la salida, cuatro en el medio poroso de la entrada y cuatro en el de salida.

Las variables medidas por los sensores se instrumentaron mediante un registrador de datos Campbell Scientific CR1000 [16,18]. Se trata de un equipo con una alta fiabilidad, bajo consumo y gran robustez ante condiciones duras de trabajo

disponiendo, además de salidas para manejar las acciones de control. Para programar este equipo se utiliza el software de soporte LoggerNet [19], encargado además de la gestión de los datos instrumentados.

Para la entrada de aire, se emplea un ventilador de 24W con caudal volumétrico regulable por tensión. Para calentar el aire, se utiliza una resistencia tipo PTC con una potencia nominal de 150W. El conjunto se puede visualizar en la Figura 6.



Figura 6: Cámara climática con sensores, actuadores y controlador/registrador.

• **Ensayos de identificación del sistema**

La variación de temperatura se obtuvo a partir de dos señales de control: tensión del ventilador y potencia de la resistencia calefactora. Para facilitar el estudio, se decidió mantener constante el valor de la tensión del ventilador y dejar como única variable manipulada la potencia de la resistencia. La identificación consistió en la aplicación de entradas tipo escalón a la variable manipulada, considerando el proceso como una caja negra.

Las pruebas de identificación se llevaron a cabo en el interior de una cámara de las instalaciones del IBV, tomando como base de partida una temperatura 5°C que suele ser la habitual en la distribución hortofrutícola [10].

El comportamiento del sistema, debido a su carácter térmico, se asemejará a un sistema de primer orden con retardo [14,15].

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{1 + \tau s} \cdot e^{-Ls} \quad (1)$$

Se estudió el comportamiento del ventilador para distintas tensiones: 6V, cuyo valor equivale a 100 m³/h, y 10V, equivalente a 167 m³/h. Con un caudal de 100 m³/h se producía un flujo laminar y sin grandes alteraciones térmicas. Por este motivo se escogió como valor óptimo la tensión de 6V. Una vez fijado este valor, se realizó la identificación de la función de transferencia de temperatura en la cámara para

distintas potencias aplicadas a la resistencia (44,5W y 60,4W).

Las diferentes potencias aplicadas al sistema se generaron por medio de salidas binarias proporcionadas por el datalogger, cuyo valor de potencia se adaptaba mediante un relé. El relé se conmutaba mediante una señal Pulse Width Modulation (PWM), en donde cuanto mayor era su ciclo de trabajo, mayor tiempo se mantenía encendido el relé, y, por tanto, mayor era la potencia media entregada a la resistencia calefactora.

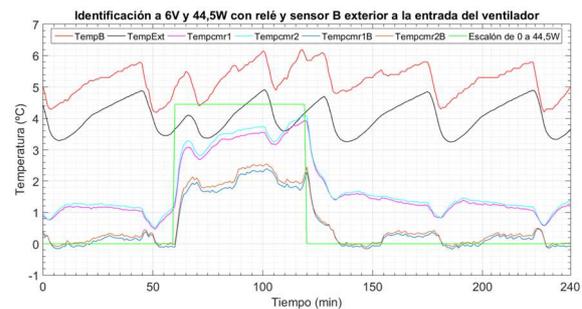


Figura 7: Identificación de la función de transferencia a 6V y con un escalón de 0 a 44,5W.

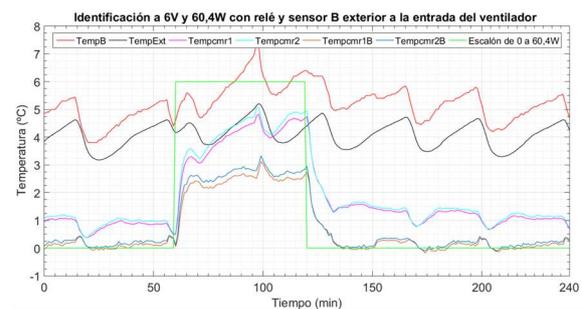


Figura 8: Identificación de la función de transferencia a 6V y con un escalón de 0 a 60,4W.

En la representación de las gráficas, tanto para 44,5W (Figura 7) como para 60,4W (Figura 8), se puede observar la temperatura exterior medida de dos maneras: mediante un sensor de temperatura SDI-12 (“TempB”) y con el datalogger (“TempExt”). Por un lado, se aprecia la temperatura corregida media de las superficies porosas (temperatura media restándole la temperatura del exterior) medida con el datalogger (“Tempcmr1” y “Tempcmr2”), y, por otro lado, restándole la temperatura exterior con el sensor B situado a la entrada del ventilador (“Tempcmr1B” y “Tempcmr2B”). El escalón es el valor medio de la PWM, que en unos casos es un escalón de 0 a 44,5W y en otros de 0 a 60,4W.

El comportamiento del sistema formado por “Tempcmr1” y “Tempcmr2” es muy diferente al de “Tempcmr1B” y “Tempcmr2B”. Esto se debe a que, el datalogger presenta un claro error de precisión, puesto que, cuando no se aplica ningún escalón, la temperatura corregida del datalogger (Tempcmr-

TempExt) es de aproximadamente 1°C, cuando realmente la diferencia debería de ser nula, ya que la temperatura de las superficies porosas tendría que ser coincidente con la temperatura exterior. Además, aparecen una serie de sobrepicos de temperatura periódicos, posiblemente debidos al desescarhe del ventilador de la habitación refrigerada.

Con el fin de realizar posteriormente un control realista, se identificó la función de transferencia en la que la temperatura exterior del sistema se mide mediante el sensor B, puesto que la otra función es correcta pero no representa a la realidad. Además, la función de transferencia será la media de las FDT identificadas para las potencias de 44,5W y 60,5W:

$$G(s) = \frac{0,0419}{1 + 2,6s} \quad (2)$$

El retardo identificado fue despreciable frente a la constante de tiempo del sistema que era igual a 2,6 minutos.

Una vez finalizada la identificación, se realizó el proceso de validación. El proceso se ajusta suficientemente a la función de transferencia identificada, como se puede observar en las Figuras 9 y 10.

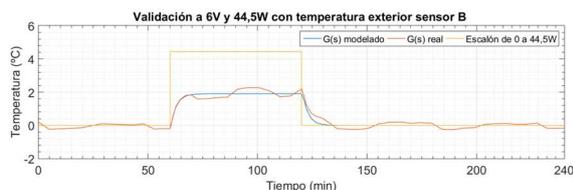


Figura 9: Validación de la función de transferencia del sistema para 6V y con un escalón de 0 a 44,5W.

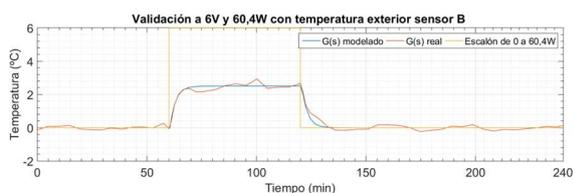


Figura 10: Validación de la función de transferencia del sistema para 6V y con un escalón de 0 a 60,4W.

• **Estudio y ejecución de controladores para cumplir los requisitos establecidos para las variables de salida**

El sistema de control está basado en una estructura básica, gestionando las acciones de control en función de la diferencia entre una temperatura deseada definida por el valor de consigna establecido y el valor de las señales de salida (temperaturas dentro de la cámara). Según el algoritmo de control, se ejecuta una acción regulatoria que aumenta o disminuye el valor de la variable controlada. (Figura 11).

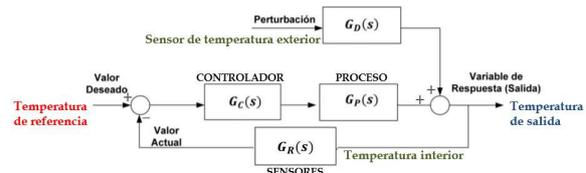


Figura 11: Estructura clásica de sistema de control realimentado.

La estrategia de control ha sido conservadora [13]. En primer lugar, se propuso utilizar un controlador proporcional (P), en donde la acción de control es proporcional a la señal de error. Sin embargo, este tipo de controlador no es capaz de anular el error en régimen estacionario. Por lo que, posteriormente, añadimos un término integral (I) que se encargó de integrar el error para así eliminarlo y mejorar su respuesta.

La acción de control del controlador proporcional integral es la siguiente [12]:

$$u_{pi}(t) = K_p \cdot \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int e(t) dt \right] \quad (3)$$

A partir del lazo de control, se ajustaron los valores de P e I, se ejecutó la simulación y posteriormente se utilizó un índice de error cuadrático, para comparar las prestaciones de las diferentes sintonías.

El objetivo de control consiste en el seguimiento de la referencia de temperatura con el requisito de que el error sea menor de ±0,5°C, tal y como se planteó en el apartado de introducción. En primer lugar, para estimar los valores de P e I, mediante simulación, se realizó una sintonía analítica mediante el método de asignación de polos.

Tomando la función de transferencia del sistema G(s) y la del controlador G_{PI}(s):

$$G(s) = \frac{K}{1 + \tau s}; \quad G_{PI}(s) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{sT_i} \right) \quad (4)$$

Tenemos la siguiente función en lazo cerrado:

$$G_{lc}(s) = \frac{G(s) \cdot G_{PI}(s)}{1 + G(s) \cdot G_{PI}(s)} \quad (5)$$

Cuya ecuación característica es:

$$1 + G(s) \cdot G_{PI}(s) = 0 \quad (6)$$

$$s^2 + \frac{1 + K_p K}{\tau} s + \frac{K_p K}{T_i \tau} = 0 \quad (7)$$

Tomando el sistema como subamortiguado ($\xi < 1$), se establece la siguiente ecuación característica:

$$s^2 + 2\xi w_n s + w_n^2 = 0 \quad (8)$$

Con las siguientes relaciones:

$$K_p = \frac{2\xi w_n \tau - 1}{K}; \quad T_i = \frac{2\xi w_n \tau - 1}{w_n^2 \tau} \quad (9)$$

Y soluciones:

$$s = -\xi w_n \pm w_n \sqrt{1 - \xi^2} j \quad (10)$$

$$s = -\sigma \pm w_d j \quad (11)$$

Se fijará el valor de la sobreoscilación M_p al 5% y el tiempo de pico t_p a 5 minutos, para calcular finalmente w_d y σ .

$$M_p = e^{-\frac{\pi}{\text{tg}\theta}} = 0,05 \rightarrow \theta = 46,36^\circ \quad (12)$$

$$t_p = \frac{\pi}{w_d} = 5 \rightarrow w_d = 0,628 \quad (13)$$

$$\theta = \arctg \frac{w_d}{\sigma} \rightarrow \sigma = 0,599 \quad (14)$$

A partir de ahí, se calcula w_n y ξ :

$$\sigma = \xi w_n \rightarrow w_n = \frac{\sigma}{\xi} = \frac{0,599}{0,69} = 0,868 \quad (15)$$

$$w_d = w_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (16)$$

$$\xi = \sqrt{1 - \left(\frac{w_d}{w_n}\right)^2} = \sqrt{1 - \left(\frac{0,628}{0,868}\right)^2} = 0,69 \quad (17)$$

Finalmente, los parámetros del controlador son los siguientes:

$$P = K_p = \frac{2\xi w_n \tau - 1}{K} = \frac{2 \cdot 0,69 \cdot 0,868 \cdot 2,6 - 1}{0,0419} = 50,46 \quad (18)$$

$$I = \frac{K_p}{T_i} = \frac{K_p w_n^2 \tau}{2\xi w_n \tau - 1} = \frac{50,46 \cdot 0,868^2 \cdot 2,6}{2 \cdot 0,69 \cdot 0,868 \cdot 2,6 - 1} = 46,765 \quad (19)$$

Se realizó una simulación previa del controlador utilizando Simulink con la estructura de la Figura 12.

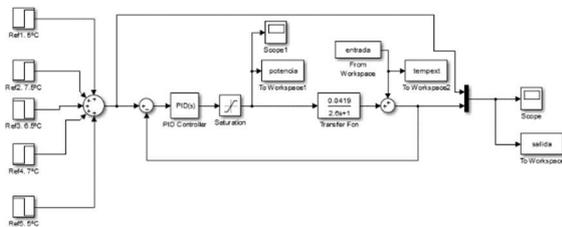


Figura 12: Estructura del control simulado en MATLAB.

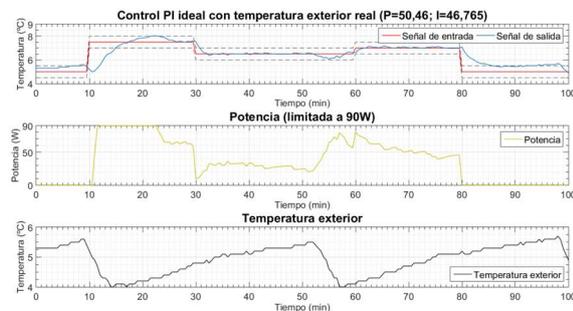


Figura 13: Control PI ideal mediante el método de asignación de polos.

El método de asignación de polos se utilizó con el fin de obtener unos valores iniciales con los que trabajar y próximamente poseer una sintonía más precisa. A la vista de los resultados de la Figura 13, la saturación en la señal de control (potencia de la resistencia calefactora) es muy elevada. Por ello, finalmente, se implementó el método de “prueba y error”, puesto que así se consiguieron reducir las sobreoscilaciones al mínimo posible (Figura 14).

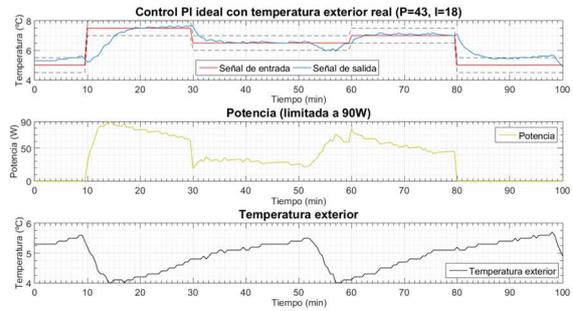


Figura 14: Control PI ideal mediante el método de prueba y error.

Una vez sintonizado el controlador con los parámetros ($P=43$ e $I=18$), se realizaron diferentes ensayos reales en las instalaciones del IBV, utilizando para ello diferentes ciclos. En la Figura 15 se puede observar los trazos rojos correspondientes al ciclo térmico a seguir y en azul la variable controlada. Las líneas discontinuas representan el límite de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ que no debe de exceder la variable controlada respecto a la señal de referencia. En amarillo se ve la acción de control y en negro la temperatura exterior con sus perturbaciones. A la vista de los resultados obtenidos, se puede afirmar que se ha alcanzado el objetivo de control, es decir, el sistema responde satisfactoriamente a las perturbaciones de temperatura, como se puede apreciar en la Figura 15.

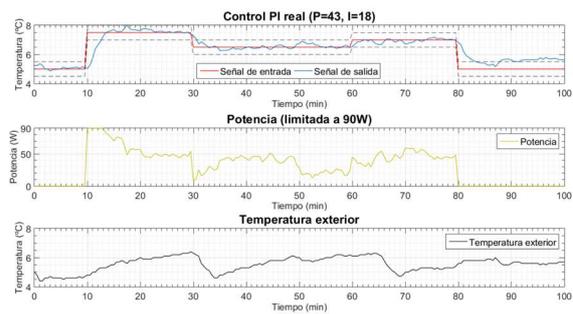


Figura 15: Resultados del control PI real.

3. CONCLUSIONES

La conclusión principal que se extrae de este trabajo es que es totalmente factible el diseño de una cámara climática de coste reducido, con un control que permita seguir un determinado ciclo temporal de temperatura. Las limitaciones que se deducen de las especificaciones del control son totalmente compatibles con las características de las condiciones térmicas que sufren los productos durante las fases de distribución; esto es, partiendo de temperaturas ideales de consignas de 5°C no es habitual que las perturbaciones observadas en los transportes y almacenamientos reales de mercancías hortofrutícolas sean superiores a 7°C [10], aunque sí que suelen ser sostenidas en el tiempo. Además, los tiempos de reacción del equipamiento de refrigeración de los contenedores o cámaras de conservación no son inferiores a los 5 minutos, con lo que los valores obtenidos de duración del transitorio permiten un control ajustado a la dinámica del proceso.

La construcción de la cámara climática no ha sido una labor simple, puesto que se han escogido unos sensores y actuadores específicos para este proyecto y además se han diseñado en 3D todas las piezas y accesorios necesarios para el correcto su funcionamiento. Cabe destacar, que la complejidad de diseñar una pieza en 3D aumenta cuando no se tienen unas medidas exactas a las que recurrir, ya que no se tiene una visión precisa de cómo va a ser la pieza hasta que no se imprima. Por lo que, varias piezas se tuvieron que rediseñar porque no cumplían las especificaciones.

Los valores de temperaturas observados en los diferentes puntos de medida concluyen que el diseño termodinámico de la cámara es acertado, las dimensiones permiten ubicar tres cajas apiladas de productos hortofrutícolas (*standard cardboard boxes*) [20] entre las dos superficies permeables, lo que dota al ensayo de un número suficiente de ejemplares para realizar los análisis físico-químicos por parte del personal del IBV.

En cuanto a la identificación del sistema en una habitación refrigerada a 5°C del IBV, al no tener un conocimiento previo de cómo se podía comportar el sistema ante cualquier escalón, se realizaron una gran cantidad de experimentos los cuales han servido para definir los límites de las acciones de control y el dimensionamiento de la cámara y sus componentes.

El control del sistema no requirió de demasiados ensayos, debido a que, con ayuda de los cálculos teóricos y simulaciones previas, teníamos un conocimiento aproximado de cómo controlar el sistema.

Lo que finalmente se puede afirmar es que, se ha logrado el objetivo principal del proyecto, con excepción de la realización de ensayos con productos perecederos. Tras un largo periodo de experimentos de identificación y de control, se ha conseguido que el sistema responda a las señales de referencia de temperatura, hasta un incremento límite de 2,5°C, tal y como se estableció inicialmente, lo que va a servir como herramienta para la supervisión y entrenamiento de modelos de cuantificación cualitativa de los productos perecederos que son sometidos a perturbaciones de condiciones climáticas.

En trabajos futuros se prevé dotar a la cámara de sistema de recirculación del aire interior con una acción de control que permita realizar la mezcla del aire exterior con el aire recirculado, lo que redundará en un control más preciso con mayores prestaciones.

English summary

DESIGN OF A CONTROLLED CLIMATIC CHAMBER TO REPRODUCE THE TRANSPORTATION OF PERISHABLE COMMODITIES

Abstract

The need to analyze food quality loss has been increasing in recent times due to the increasingly restrictive traceability conditions in the different distribution stages of perishable products. The availability of tools to estimate the quality losses in these logistic phases would help to reduce the waste of food, often discarded due to inadequate preservation conditions.

The objective of the project, where this work is framed, is to obtain quality-losses indicators of commodities when they are exposed to undesired thermal variations. These indicators would provide qualitative values of the quality of the perishable merchandise by estimating variations in the shelf life of the commodities. As part of this project, a portable climatic chamber has been designed and built in which controlled thermal cycles can be reproduced during the shelf life of the commodity and, in this way, different quality parameters can be evaluated and related to the preservation conditions.

Due to the high number of tests required to obtain reliable indicators, this work proposes the design of

an easily reproducible and scalable low-cost chamber where it is feasible to subject the perishable product to controlled thermal alterations during the commercial life of the commodity, and to obtain a dynamic shelf-life as a function of variations in climatic conditions. This work deals with the design, sizing, instrumentation and the different elements that make up the control system, as well as the identification and adjustment of the controller. The results and conclusions show that the controlled climatic chamber developed in this paper, is a useful tool to obtain indicators of quality losses under different climatic conditions.

Keywords: food quality losses, shelf-life, perishable commodities, climatic chamber, simulation, process identification.

Referencias

- [1] Artés-Hernández, F. Factors affecting postharvest quality. *4th International on-line Course on Postharvest and Fresh-cut Technologies*. 2019
- [2] Edjabou, M., Petersen, C.; Scheutz, C; Astrup, T.; Food waste from Danish households: Generation and composition. *Waste Management Vol 52*, 2016
- [3] Cantwel, M.; Kasmire, R.E. Postharvest handling systems: Flower, leafy and stem vegetables. In *Postharvest Technology of Horticultural Crops*; Kader, A.A., Ed.; UC Davis: Davis, CA, USA, Vol 3311, pp. 423–434. 2002.
- [4] Tsang, Y. P., Choy, K. L., Wu, C. H., Ho, G. T. S., Lam, H. Y., & Tang, V. An intelligent model for assuring food quality in managing a multi-temperature food distribution centre. *Food Control*. Vol 90, pp. 81-97. 2018.
- [5] Aung, M. M., & Chang, Y. S. Traceability in a food supply chain: Safety and quality perspectives. *Food Control*, 39(1), 172-184. 2014
- [6] Díaz-Ruiz, R., Costa-Font, M., López-i-Gelats, F., & Gil, J. M. Food waste prevention along the food supply chain: A multi-actor approach to identify effective solutions. *Resources, Conservation and Recycling*. Vol 149, pp. 249-260. 2019
- [7] Cantwell, M.; Suslow, T. Lettuce, Chrispead: Recommendations for Maintaining Postharvest Quality. 2002. Available online: <http://postharvest.ucdavis.edu/pfvegetable/LettuceChrispead> Accessed: 2020-1-10
- [8] ASTM. Physical Requirements Guidelines for Sensory Evaluation Laboratories; *ASTM International: Philadelphia, PA, USA*, 1986
- [9] Torres-Sánchez, R.; Martínez-Zafra, M.T.; Castillejo, N.; Guillamón-Frutos, A.; Artés-Hernández, F. Real-Time Monitoring System for Shelf Life Estimation of Fruit and Vegetables. *Sensors* 2020, vol 20, 1860
- [10] Martínez-Zafra, M.T. Monitorización de las variables ambientales durante el transporte de productos perecederos para estimar en tiempo real las pérdidas de Calidad. Tesis Doctoral. 2020. Disponible en: <https://repositorio.upct.es>
- [11] Características técnicas ISOVER Climaver Neto. <https://www.isover.es/productos/climaver-neto>
- [12] Astrom, Karl J. Control PID avanzado. 1ªed. Pearson, 2009. ISBN 9788483225110
- [13] Chuk, Daniel. Los sistemas de primer orden y los Controladores PID. 2012 [en línea]. Disponible en: <http://dea.unsj.edu.ar/control2/ControladoresPID.pdf>
- [14] Dorf, Richard C. Sistemas modernos de control. 1ªed. Addison-Wesley Iberoamericana, 1989. ISBN 0201644177
- [15] Ogata, Katshuiko. Ingeniería de Control Moderna. 5ªed. Pearson, 2010. ISBN 9788483229552
- [16] CRBasic Editor: Stand-Alone Installation for CRBasic Editor [en línea]. Disponible en: <https://www.campbellsci.es/crbasiceditor>
- [17] Control de Procesos [en línea]. Disponible en: http://lcr.uns.edu.ar/Control_Procesos/Teor%C3%ADa/Control%20de%20Procesos_cap5.pdf
- [18] Dataloggers y Sistemas Adquisición de Datos [en línea]. Disponible en: <https://www.campbellsci.es/data-loggers>
- [19] LoggerNet: Software de soporte para datalogger [en línea]. Disponible en: <https://www.campbellsci.es/loggernet>
- [20] Pautas para el transporte de alimentos perecederos [en línea]. Disponible en: <https://www.deccoiberica.es/pautas-para-el-transporte-de-alimentos-perecederos/>



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-ncsa/4.0/deed.es>).