

# IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS DE CONTROL DE ATMÓSFERAS EN SISTEMAS EMBEBIDOS PARA SU APLICACIÓN EN CÁMARAS CLIMÁTICAS PORTÁTILES

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

mariaaranzazu.segado@edu.upct.es; juliojose.ibarrola@upct.es; jaime.gimenez@upct.es; roque.torres@upct.es

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

## Resumen

*El control de mercancías perecederas es uno de los temas de interés prioritario en la gestión sostenible de los productos. El desarrollo de sistemas portables fácilmente reproducibles supondría la posibilidad de ensayar los efectos de perturbaciones térmicas en las mercancías perecederas para predecir su vida útil.*

*El objetivo del proyecto consiste en diseñar y mejorar la gestión de la temperatura y humedad en hábitáculos aislados térmicamente para el control preciso de los parámetros en el estudio de la vida útil de productos perecederos. Para ello, se realizará un estudio con un simulador en el que se controlarán las condiciones de calidad de determinados productos perecederos, alterando las condiciones de conservación dentro de la cámara mediante la introducción de ciclos de temperatura reales en el transporte de mercancías.*

*La finalidad principal de este trabajo se basa en que el simulador sea totalmente reproducible y alcanzable para cualquier tipo de usuario final. Para ello, se implementará una arquitectura de adquisición de datos a tiempo real en código abierto mediante soluciones abiertas, flexibles y económicas proporcionadas por la plataforma Raspberry Pi.*

**Palabras clave:** calidad de los productos, cámara climática, simulación, control, adquisición de datos a tiempo real, sistema embebido.

## 1 INTRODUCCIÓN

En numerosas ocasiones, se producen alteraciones en la temperatura en el interior de los vehículos de transporte de mercancías bajo condiciones de conservación en frío, que derivan en roturas de cadena de frío que podrían provocar el desecho de los alimentos por incumplimiento de normas de transporte refrigerado. Por ello, es muy importante el análisis de

la legislación vigente (RD 1202/2005, de 10 de octubre), ya que establece diversas condiciones obligatorias a tener en cuenta en cuanto a higiene y transporte [1].

Actualmente, muchos de los alimentos que son desechados no están demasiado dañados y probablemente sí podrían ser aptos para su comercialización en mercados con más rotación, es decir, con condiciones de consumos anticipados. Por tanto, es importante estimar la vida útil de los productos partiendo de un límite de comerciabilidad (LC), que consiste en el “día límite dentro del cual un producto puede ser comercializado garantizando unos estándares de calidad” [2].

La simulación de estos episodios de evolución/alteración de temperaturas durante el transporte, mediante su implementación en cámaras frigoríficas portátiles que sean capaces de emular el comportamiento de las temperaturas y humedades ante perturbaciones, tiene como objetivo la elaboración de modelos de comportamiento del producto perecedero para predecir su límite de comercialización cuando ha sido sometido a estos episodios indeseados. [3]

En trabajos previos [4], se comenzó a construir un prototipo de una cámara climática portátil (en adelante simulador). La envolvente del simulador se construyó a partir de un conducto rectangular de lana de vidrio CLIMAVER NETO de la marca ISOVER [5], este material es aislante térmico, por lo que mantiene constante la temperatura de su interior. Además, con el objetivo de homogeneizar el flujo de temperatura en el interior del simulador se instalaron dos medios porosos modelados en 3D, uno a la entrada y otro a la salida de la cámara. Para abaratar costes, el simulador se utiliza dentro de una cámara refrigerada de grandes dimensiones con ajustes de temperatura inferiores a 5 °C. Dado que esta es la temperatura a la que se suelen transportar gran cantidad de productos perecederos refrigerados, no será necesario incluir un sistema de refrigeración en el interior del simulador, solo se

requiere de calentamiento mediante una resistencia calefactora cuyo flujo caliente, impulsado por un ventilador, solventará los episodios de perturbación que ocurren en los ciclos de transporte reales, representados en estos ensayos por medio de ciclos variables en la temperatura exterior de la cámara simulador. Los sensores de medida de temperatura y humedad que se han empleado se encuentran ubicados en diferentes sectores del interior de la cámara y presentan el protocolo de comunicación SDI-12 [6] cuyas librerías son de fácil acceso. También, se insertarán en el interior de los productos perecederos cuyo comportamiento se pretende analizar, sondas de temperatura de pequeño tamaño con el objetivo de analizar las dinámicas térmicas entre el producto y aire interior de la cámara.

El ajuste de parámetros de medida, identificación, control y adquisición de datos a tiempo real se realiza mediante una interfaz gráfica de usuario, lo que permite integrar diversas opciones de configuración e introducir las secuencias de simulación de parámetros mediante curvas de evolución temperatura/tiempo. Las dimensiones del sistema de control basado en uno de los sistemas embebidos más competitivos actualmente en el mercado, Raspberry Pi 3B [7].

Durante la realización de los ensayos de calidad de los productos, el sistema de control de la cámara diseñada, seguirá una consigna de temperatura variable en el tiempo proveniente de patrones reales procedentes de las variaciones térmicas medidas en las cargas refrigeradas de los camiones de transporte, siendo la variable manipulada la potencia de la resistencia calefactora y la variable controlada la temperatura interior de la cámara. De este modo el sistema podrá emular los patrones térmicos reales y el producto sometido a esas alteraciones térmicas podrá ser analizado sin necesidad de ser recogido y analizado en destino (donde la mercancía del camión vaya a ser descargada). Por otro lado, la perturbación consistirá en la apertura de la cámara para distintos ángulos y tiene como objetivo la verificación de la calidad del controlador, pudiendo así comprobar que la cámara funciona adecuadamente ante cambios de temperatura no controlados.

## 2 METODOLOGÍA Y RESULTADOS

### 2.1 DESARROLLO DEL SOFTWARE: COMUNICACIÓN UART ENTRE INTERFAZ GRÁFICA Y RASPBERRY PI 3B

Para la implementación de este proyecto se decidió implementar una solución hardware de instrumentación y registro de datos mediante una

Raspberry Pi 3B [7] programada en Python, lenguaje de programación mejor valorado en el Ranking IEEE [8], realizando una comunicación con el usuario a través de una interfaz gráfica de usuario realizada bajo Windows Forms C# (Figura 1).

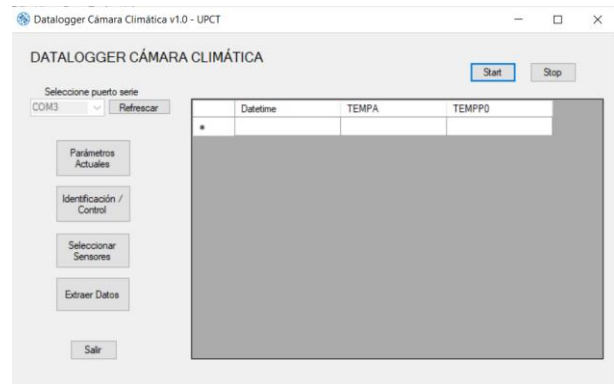


Figura 1: Interfaz gráfica datalogger cámara climática.

La funcionalidad principal del software de adquisición de datos a tiempo real es la siguiente:

- Configurar parámetros para identificación / control:

La configuración básica incluye el tiempo de ciclo de muestreo, número de muestras por cada ciclo de muestreo y la duración total del ensayo. Para el ensayo de identificación se debe configurar el ciclo de trabajo para cada ciclo de muestreo. Por otro lado, para el ensayo de control se debe configurar el ciclo de temperaturas de referencia que podrá ser constante o variable en el tiempo (Figura 2). Si el usuario desea configurar un ciclo variable, podrá hacerlo de manera sencilla partiendo de una gráfica donde podrá representar la evolución temperatura/tiempo para un tiempo de ensayo determinado que puede prolongarse varios días dependiendo de la duración del viaje real. Así mismo también está previsto la comunicación real del simulador con los sensores de temperaturas instalados en los camiones de transporte a través de un servidor que permita la conexión directa entre el transporte real y la cámara simulador [9,10].

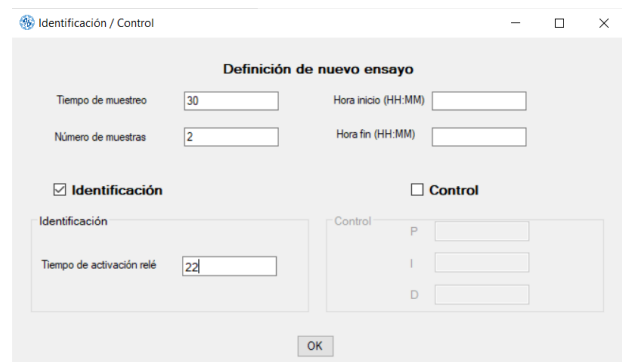


Figura 2: Módulo Identificación y Control.

- **Configurar sensores de medida:**

Este módulo presenta la funcionalidad de reconocimiento de sensores, selección de sensores que se deseen utilizar para la medida y definición de alias para las medidas de cada sensor SDI-12 y analógico seleccionado (Figura 3).

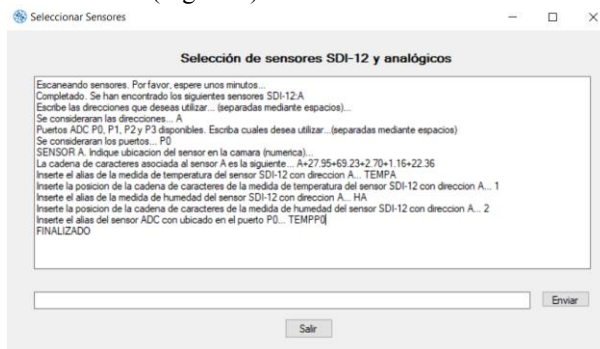


Figura 3: Módulo Configurar Sensores.

- **Inicio y parada del ensayo:**

Cuando se pulsa el botón “Start” se envían los parámetros de medida a la Raspberry Pi y comienza el ensayo, mostrando en la interfaz las medidas en tiempo real (Figura 4). Por otro lado, cuando se pulsa el botón “Stop” se detiene el ensayo de medición.

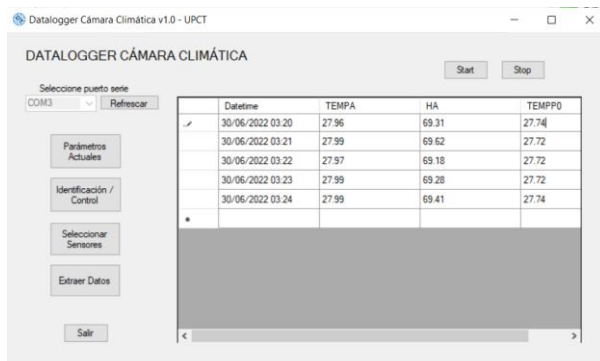


Figura 4: Módulo Inicio Ensayo.

- **Extraer datos:**

Los datos se envían desde un fichero txt de la Raspberry Pi al PC mediante el protocolo de transferencia de datos XModem (Figura 5) [11].

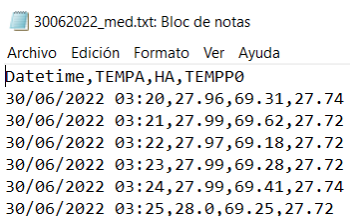


Figura 5: Módulo Extraer Datos.

## 2.2 ENSAYOS DE IDENTIFICACIÓN Y CONTROL

Para la realización de ensayos de identificación y control, se ha empleado una cámara simulador (Figura 6), cuyas características técnicas se han detallado en el apartado de introducción del presente trabajo.



Figura 6: Cámara simulador.

El funcionamiento del simulador se resume en el siguiente diagrama de bloques (Figura 7):

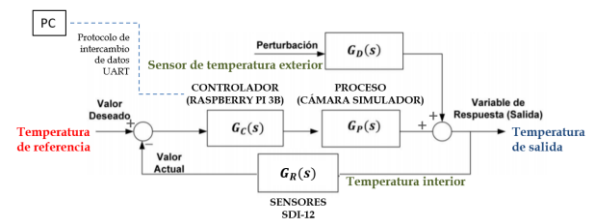


Figura 7: Diagrama de bloques de control en lazo cerrado.

### 2.2.1 Ensayos de identificación y control real sin producto

Para llevar a cabo la identificación y control sin producto en el interior de la cámara, se procedió de una manera similar que en trabajos anteriores [4], obteniendo unos valores de acción proporcional P=40 y de acción integral I=15.

### 2.2.2 Ensayos de control real con producto

Se realizaron ensayos de control en el interior del simulador, siendo la mandarina el producto escogido (Figura 8).



Figura 8: Ensayo de control real con mandarinas.

El ciclo de referencias de temperatura es variable con el tiempo y previamente seleccionado por el usuario.

- Sin perturbación:

El ensayo de control con producto se llevó a cabo con los mismos valores de acción proporcional e integral que en los ensayos sin producto (Figura 9).

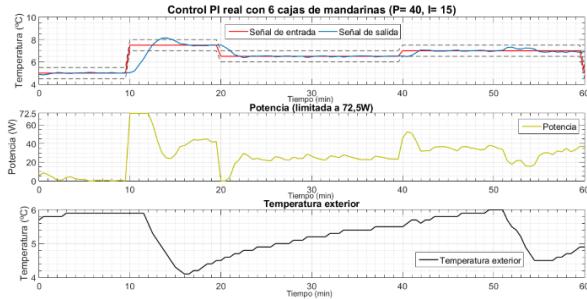


Figura 9: Control PI real con mandarinas sin perturbaciones.

Sabiendo que el error es la diferencia entre la señal de entrada ( $T_{ref}$ ) y la señal de salida ( $T_{mediarejillas}$ ):

$$e(t) = T_{ref}(t) - T_{mediarejillas}(t) \quad (1)$$

Se puede comparar el control con y sin producto en el interior para una misma acción de control (Tabla 1). Esta comparación se hará por medio de un índice de calidad del error, conocido como MSE (Mean Square Error), que se define de la siguiente manera:

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N (e(t))^2}{N} \quad (2)$$

Tabla 1: Comparación control sin / con producto.

Comparación calidad del control sin / con producto		
Tiempo ensayo	Diferencia $T_{ref}$ y $T_{real}$ Control sin producto en el interior	Diferencia $T_{ref}$ y $T_{real}$ Control con producto en el interior
0:00:00	0,025	0,125
0:05:00	0	-0,025
0:10:00	2,45	2,463
0:15:00	-0,413	-0,375
0:20:00	-1,05	-1,025
0:25:00	-0,137	-0,05
0:30:00	0,05	0,037
0:35:00	-0,025	-0,037
0:40:00	0,45	0,462
0:45:00	0,013	0,013
0:50:00	-0,05	0,037
0:55:00	0,05	0,075
1:00:00	0,01	0,05
<b>MSE</b>	<b>0,57737</b>	<b>0,57709</b>

Se puede observar que, el índice de calidad del control es similar. Esto quiere decir que, no hay diferencias significativas en el control, por lo que se afirma que, la presencia del producto no afecta a la dinámica de la

cámara. Cabe destacar que, el producto se encontraba a la misma temperatura que la habitación refrigerada, por lo que por ese motivo no se observó ningún salto térmico que pudiese influir negativamente en el controlador.

- Con perturbación:

Con el objetivo de analizar la eficiencia del controlador, se realizaron distintos ensayos de control con perturbaciones. Dichas perturbaciones consisten en la apertura de la puerta de la cámara para distintos ángulos ( $45^\circ$ ,  $30^\circ$  y  $15^\circ$ ) (Figura 10).

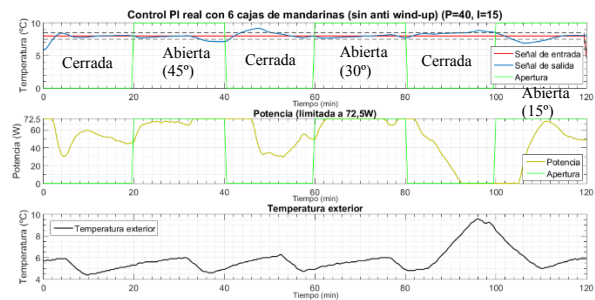


Figura 10: Control PI real con mandarinas con perturbaciones.

Aparentemente, se puede observar que el comportamiento del controlador es favorable. No obstante, al mantener la señal de control saturada en un controlador integral, el error acumulado ha ido incrementándose lentamente. Este fenómeno se conoce como efecto wind-up [12].

Para mitigar este efecto, se debe añadir al controlador el método anti wind-up, mecanismo de control que busca evitar que la acción integral de un sistema de control continúe creciendo cuando el sistema se encuentra en los límites de saturación (Figura 11). Para ello, cuando la acción de control se satura se debe igualar el error acumulado actual al anterior, con el objetivo de que la acción integral no ascienda [13].

$$u_{pi}(t) = K_p \cdot \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^{t-1} e(t) dt \right] \quad (3)$$

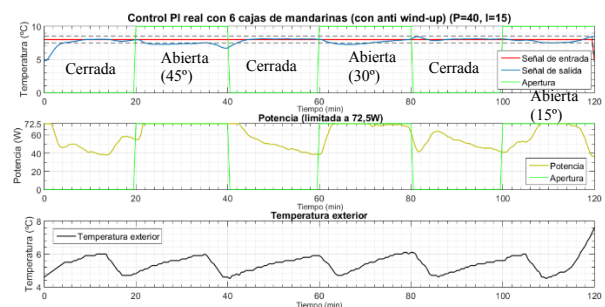


Figura 11: Control PI real con mandarinas con perturbaciones y efecto anti wind-up.

A continuación, se adjunta una tabla comparativa del error del control sin/con anti wind-up (Tabla 2):

Tabla 2: Comparación control sin/con anti wind-up.

Comparación error del control sin / con efecto anti wind-up		
Tiempo ensayo	Diferencia Tref y Treal Control con perturbaciones (sin anti wind-up)	Diferencia Tref y Treal Control con perturbaciones (con anti wind-up)
0:00:00	2,125	2,63
0:10:00	0,162	-0,025
0:20:00	-0,025	0,05
0:30:00	0,012	0,625
0:40:00	0,825	1,263
0:50:00	-0,575	-0,075
1:00:00	0,025	-0,063
1:10:00	0,075	0,613
1:20:00	0,313	-0,113
1:30:00	-0,438	-0,075
1:40:00	-0,475	-0,087
1:50:00	0,75	0,475
2:00:00	-0,075	-0,413

A la vista de los resultados, se puede observar que el comportamiento del controlador ha mejorado satisfactoriamente añadiendo el método anti wind-up. En este caso, no es relevante el cálculo del índice de calidad de control debido a que lo que se quería verificar es que la acción de control no ha continuado incrementándose tras alcanzar la temperatura deseada en el ciclo de referencia.

No obstante, la saturación de la acción de control sigue siendo muy elevada, ya que al introducir una perturbación de esta tipología la resistencia calefactora requiere de una cantidad mayor de potencia y en ocasiones estos valores pueden desviarse del rango de temperatura de operación de la cámara. Para ello, podría ser interesante identificar el sistema mediante una estrategia FeedForward, controlador auxiliar que se añadiría al lazo cerrado actual de control con el objetivo de anticiparse a las perturbaciones que pudieran afectar al lazo de control.

### 3 CONCLUSIONES

Como conclusión, se puede confirmar que se ha logrado diseñar una cámara que es totalmente replicable por cualquier usuario. Es una herramienta muy útil, debido a que permite simular un ciclo de temperaturas real en el transporte y analizar cuáles son las mejores condiciones para cada tipo de alimento.

Una de las condiciones de diseño más importantes de la cámara era la necesidad de que el flujo fuese uniforme en cualquier punto, para evitar la pérdida de calidad de los alimentos. Por ello, se tuvo que realizar un estudio termodinámico amplio, explicado en los

trabajos anteriores [4], en donde se pudo observar que la mejor solución para homogeneizar el flujo en toda la cámara era colocando unos medios porosos en los laterales.

En cuanto a la instrumentación, se han utilizado sensores económicos y de muy alta precisión con un margen de error mínimo, lo cual hace que los ensayos sean fiables. Por otro lado, se debe tener en cuenta la gran diferencia a nivel económico y de eficiencia de emplear un datalogger comercial a uno diseñado y programado ad-hoc.

Por último, es muy importante destacar que el control del sistema presenta un buen comportamiento incluso introduciendo perturbaciones en el interior, por lo que se afirma que es técnicamente válido.

En definitiva, este sistema servirá en el futuro como una herramienta para la supervisión y entrenamiento de modelos de cuantificación cualitativa de productos perecederos que son sometidos a perturbaciones de condiciones climáticas.

### English summary

## DEVELOPING OF CONTROL DECISION ALGORITHMS FOR ITS APPLICATION IN PORTABLE CLIMATE CHAMBERS

### Abstract

*The monitoring of perishable goods is one of the priority areas of interest in sustainable product management. The development of easily reproducible portable systems would make it possible to test the effects of thermal disturbances on perishable goods in order to predict their shelf life.*

*The aim of the project is to design and improve the management of temperature and humidity in thermally insulated enclosures for the precise control of parameters in the study of the shelf life of perishable products. To this end, a study will be carried out with a simulator in which the quality conditions of certain perishable products will be controlled, altering the conservation conditions inside the chamber by introducing real temperature cycles in the transport of goods.*

*The main purpose of this work is based on making the simulator fully reproducible and achievable for any type of end user. To this end, an open source real-time data acquisition architecture will be implemented*

*using open, flexible and cost-effective solutions provided by the Raspberry Pi platform.*

**Keywords:** product quality, climatic chamber, simulation, control, real-time data acquisition, embedded system.

## Referencias

- [1] Real Decreto 1202/2005, de 10 de octubre, sobre el transporte de mercancías perecederas y los vehículos especiales utilizados en estos transportes. *Boletín Oficial del Estado*, Madrid, 21 de octubre de 2005, núm. 252, pp. 34391 a 34392.
- [2] 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>
- [3] Torres-Sánchez, R., Martínez-Zafra, M. T., Castillejo, N., & Artes-Hernandez, F. (2019, June). Environmental variables traceability device to predict postharvest quality and remaining shelf life of fruit and vegetables. In VI International Symposium on Applications of Modelling as an Innovative Technology in the Horticultural Supply Chain Model-IT 1311 (pp. 209-216).
- [4] Segado Fernández, M.A., Ibarrola-Lacalle, J.J., Giménez-Gallego, J., Torres-Sánchez, R. Diseño y construcción de cámara climática controlada para reproducir episodios de transporte de mercancías perecederas. En XLII Jornadas de Automática: libro de actas. Castelló, 1-3 de septiembre de 2021 (pp. 333-340). DOI <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498043.333> capítulo: DOI <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498043> libro:
- [5] Características técnicas ISOVER Climaver Neto [en línea]. Disponible en: <https://www.isover.es/productos/climaver-neto>
- [6] SDI-12 Specification [en línea]. Disponible en: [http://www.sdi-12.org/current\\_specification/SDI-12\\_version-1\\_4-Jan-30-2021.pdf](http://www.sdi-12.org/current_specification/SDI-12_version-1_4-Jan-30-2021.pdf)
- [7] Raspberry Pi Foundation [en línea]. Disponible en: <https://www.raspberrypi.org/>
- [8] Top Programming Languages - IEEE Spectrum [en línea]. Disponible en: <https://spectrum.ieee.org/top-programming-languages/>
- [9] Torres-Sanchez, R., Martínez-Zafra, M. T., Castillejo, N., Guillamon-Frutos, A., & Artes-Hernandez, F. (2020). Real-time monitoring system for shelf life estimation of fruit and vegetables. *Sensors*, 20(7), 1860.
- [10] Torres-Sanchez, R., Zafra, M. T. M., Soto-Valles, F., Jiménez-Buendía, M., Toledo-Moreo, A., & Artés-Hernández, F. (2021). Design of a Distributed Wireless Sensor Platform for Monitoring and Real-Time Communication of the Environmental Variables during the Supply Chain of Perishable Commodities. *Applied Sciences*, 11(13), 6183.
- [11] Pérez-Iglesias, C. Implementación del protocolo de comunicaciones X-MODEM sobre un microcontrolador. 2004. Disponible en: [http://deeea.urv.cat/public/PROPOSTES/pub/pdf/518\\_pub.pdf](http://deeea.urv.cat/public/PROPOSTES/pub/pdf/518_pub.pdf)
- [12] Anti WindUp en un Control PID [en línea]. Disponible en: <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/anti-windup-en-un-control-pid/>
- [13] Astrom, Karl J. Control PID avanzado. 1ºed. Pearson, 2009. ISBN 9788483225110



© 2022 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-nc-sa/4.0/deed.es>).